

научно-теоретический и производственный журнал

АГРАРНАЯ НАУКА

AGRARIAN
SCIENCE

ISSN 0869-8155 (print)
ISSN 2686-701X (online)

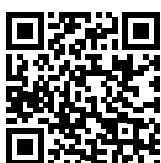
4
2026



БЕСПЛАТНО
скачать журнал
и подписаться



Наш
канал
в MAX



Подпишитесь
на наш
Telegram канал!



ЗООТЕХНИЯ

Влияние кормовой добавки на основе биомассы дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* на яичную продуктивность перепелов

45

АГРОНОМИЯ

Основные показатели качества зерна перспективных линий озимой твердой пшеницы

80

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Возможности использования артемии

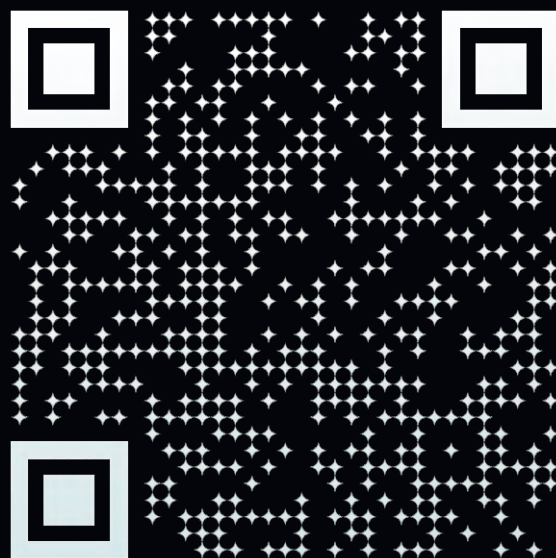
110

ДОСТАВЛЯЕМ
ДАЖЕ
В КОСМОС



УЗНАЙ, КАК МЫ
ДОСТАВИЛИ
РЫБНУЮ И
МЯСОКОСТНУЮ
МУКУ ПРЯМО
В КОСМОС!

Смотреть видео



Надежность,
выведенная на орбиту!

ASK

Ежемесячный научно-теоретический и производственный журнал выходит один раз в месяц.

© журнал «Аграрная наука»

© авторы

Авторские права © 2024 Это статья открытого доступа, распространяемая в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), позволяющей третьим лицам копировать и распространять материал на любом носителе или в любом формате, а также делать ремиксы, преобразовывать и дополнять материал в любых целях, даже коммерческих, при условии, что исходная работа надлежащим образом цитируется и указывается ее лицензия.



DOI журнала 10.32634/0869-8155

Журнал «Аграрная наука» решением ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук. Распоряжение Минобрнауки России от 12 февраля 2019 г. № 21-р

Журнал «Аграрная наука» включен в базу данных AGRIS (Agricultural Research Information System) — Международную информационную систему по сельскому хозяйству и смежным с ним отраслям.

Журнал «Аграрная наука» включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Полные тексты статей доступны на сайте eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru>

Учредитель: Общество с ограниченной ответственностью «ВИК — здоровье животных»

Шеф-редактор Костромичева И.В.

Научный редактор Долгая М.Н.

Дизайн и верстка Антонов С.Н.

Библиограф Нерозник Д.С.

Журналист Седова Ю.Г.

Юридический адрес: 107053, РФ, г. Москва, ул. Садовая-Спасская, д. 20

Почтовый адрес: 109147, РФ, г. Москва, ул. Марксистская, д. 3, стр. 2

Тел. редакции +7 (916) 616-05-31
agrovetpress@inbox.ru

www.vetpress.ru

<https://agrarnayanauka.ru>

Реклама в журнале: +7 (927) 155-08-10

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-76484 от 02 августа 2019 года.

На печатный журнал можно подписаться:

в редакции по тел. +7 (495) 777-67-67, доб. 1453, agrovetpress@inbox.ru;

в агентстве подписки ООО «Урал-Пресс Округ» — <https://www.ural-press.ru/catalog/>

Бесплатная подписка на электронную версию — <https://agrarnayanauka.ru>

Подписка на архивные номера и отдельные статьи: на сайте научной редакции <https://www.vetpress.ru/jour>

на сайте научной электронной библиотеки www.elibrary.ru

Свободная цена.

Тираж 2000 экз.

Подписано в печать 13.04.2026

Дата выхода в свет 20.04.2026

Отпечатано в типографии

ООО «Поли Принт Сервис», 127015,

г. Москва, ул. Бутырская, д. 86

В октябре 1956 г. был основан журнал «Вестник сельскохозяйственной науки», а в 1992 г. он стал называться «Аграрная наука».

Издатель:

Автономная некоммерческая организация «Редакция журнала «Аграрная наука» 107053, Россия, г. Москва, ул. Садовая-Спасская, д. 20

Главный редактор

Виолин Б.В., кандидат ветеринарных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии — филиал ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.П. Коваленко РАН», г. Москва, Россия.

Заместитель главного редактора:

Ребезов М.Б., доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатовой Российской академии наук, г. Москва, Россия.

Редакционная коллегия

ЗООТЕХНИКА И ВЕТЕРИНАРИЯ

РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ:

Аббас Р.З., PhD, доцент, Сельскохозяйственный университет Фейсалабад, г. Фейсалабад, Пакистан.

Ансори А.Н.М., PhD, Университет Эйрланга, г. Сурабая, Индонезия.

Василевич Ф.И., доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К.И. Скрябина, г. Москва, Россия.

Джаванмард М., доктор ветеринарной медицины, Иранская научно-исследовательская организация по науке и технологиям, г. Тегеран, Иран.

Зайц И., доктор ветеринарных наук, Университет ветеринарии и фармацевтики в Брно, г. Брно, Чехия.

Кощаев А.Г., доктор биологических наук, профессор, академик РАН, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия.

Панин А.Н., доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия.

Подобед Л.И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Институт животноводства Национальной академии аграрных наук Украины, г. Харьков, Украина.

Уша Б.В., доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия.

Фисинин В.И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт птицеводства Российской академии наук, г. Сергиев Посад, Россия.

Юлдашбаев Ю.А., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Ятусевич А.И., доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины, г. Витебск, Беларусь.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Абдурасулов А.Х., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан.

Абилов А.И., доктор биологических наук, профессор, Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, Московская обл., Россия.

Акназаров Б.К., доктор ветеринарных наук, профессор, Кыргызский национальный аграрный университет им. К.И. Скрябина, г. Бишкек, Кыргызстан.

Алиев А.Ю., доктор ветеринарных наук, Прикаспийский зональный научно-исследовательский ветеринарный институт, г. Махачкала, Россия.

Андреева А.В., доктор биологических наук, профессор, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия.

Горелик О.В., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Россия.

Гриценко С.А., доктор биологических наук, доцент, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия.

Дерхо М.А., доктор биологических наук, профессор, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия.

Колесник Е.А., доктор биологических наук, доцент, Государственный университет просвещения, г. Москва, Россия

Концевая С.Ю., доктор ветеринарных наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Косилов В.И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Оренбургский государственный аграрный университет, г. Оренбург, Россия.

Лоретц О.Г., доктор биологических наук, профессор, Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Россия.

Лысенко Ю.А., доктор биологических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Миронова И.В., доктор биологических наук, профессор, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия.

Некрасов Р.В., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, Московская обл., Россия.

Позябин С.В., доктор ветеринарных наук, профессор, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К.И. Скрябина, г. Москва, Россия.

Радчиков В.Ф., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, г. Жодино, Беларусь.

Рустамова С.И., PhD, Ветеринарный научно-исследовательский институт при Минсельхозе Республики Азербайджан, г. Баку, Азербайджан.

К основным целям издания относятся: продвижение российской и мировой аграрной науки, содействие прогрессивным разработкам и развитию инновационных технологий, формирование теоретических основ для производителей сельскохозяйственной продукции, поддержка молодых ученых, освещение и популяризация передовых научных исследований.

Научная концепция издания предполагает публикацию современных достижений в аграрной сфере, результатов ключевых национальных и международных исследований. К публикации приглашаются как отечественные, так и зарубежные авторы.

Журнал «Аграрная наука» способствует обобщению практических достижений в области сельского хозяйства, повышению научной и практической квалификации исследователей и практиков данной отрасли.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна. Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов публикуемых материалов. Ответственность за содержание рекламы несут рекламодатели.

Семенов В.Г., доктор биологических наук, профессор, Чувашский государственный аграрный университет, г. Чебоксары, Россия.

Сотникова Л.Ф., доктор ветеринарных наук, профессор, Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия.

Степанова М.И., доктор биологических наук, профессор, Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия.

Топурия Л.Ю., доктор биологических наук, профессор, Оренбургский государственный аграрный университет, г. Оренбург, Россия.

Щербаков П.Н., доктор ветеринарных наук, доцент, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия.

АГРОНОМИЯ

РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ:

Нтсомбох-Нцефонг Г., PhD, Университет Яунде I, г. Яунде, Камерун.

Джураев М.Я., PhD, доцент, Андижанский институт сельского хозяйства и агротехнологий, г. Андижан, Узбекистан.

Насиев Б.Н., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, г. Уральск, Казахстан.

Тирувенгадам М., PhD, Университет Конкук, г. Сеул, Южная Корея.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Бунин М.С., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Центральная научная сельскохозяйственная библиотека, г. Москва, Россия.

Гричанов И.Я., доктор биологических наук, доцент, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, г. Пушкин, Россия.

Долженко Т.В., доктор биологических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия.

Драгавцева И.А., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства и виноделия, г. Краснодар, Россия.

Зейналов А.С., доктор биологических наук, Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, г. Москва, Россия.

Исламгулов Д.Р., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия.

Казахмедов Р.Э., доктор биологических наук, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, г. Дербент, Россия.

Калмыкова Е.В., доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград, Россия.

Никитин С.Н., доктор сельскохозяйственных наук, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.С. Немцева, г. Ульяновск, Россия.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ:

Афрасьяб Х., доктор гидромеханики и гидромеханики, Университет Кебангсаан Малайзия, Банги, Малайзия.

де Соуза К.К., PhD, Региональный университет Блюменау, г. Блюменау, Бразилия.

Зенгин Г., PhD, профессор, Сельчукский университет, г. Сельчуклу-Конья, Турция.

Кузнецова О.А., доктор технических наук, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, г. Москва, Россия.

Миронеску М., доктор технических наук, профессор, Университет Лучиана Блага в Сибиу, г. Сибиу, Румыния.

Саркар Т., PhD, Политехнический институт Мальды, г. Мальда, Индия.

Сложенкина М.И., доктор биологических наук, профессор, член-корр. РАН, Поволжский НИИ производства и переработки мясо-молочной продукции, г. Волгоград, Россия.

Смауи С., PhD, Университет Сфакса, г. Сфакс, Тунис.

Фавзи М.М., PhD, профессор, Маврикийский университет, г. Редунт, Маврикий.

Хан А., доктор гидромеханики и гидротехники, Университет Кебангсаан Малайзия, г. Банги, Малайзия.

Хан М.У., PhD, Сельскохозяйственный университет Фейсалабад, г. Фейсалабад, Пакистан.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Аль-Сухайми С.А., PhD, профессор, Город научных исследований и технологических приложений, г. Нью-Борг-Эль-Араб, Александрия, Египет

Бабич О.О., доктор технических наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия.

Броханов А.Ю., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт агроинженерных и экологических проблем — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург, Россия.

Есимбеков Ж.С., PhD, Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности, г. Алматы, Казахстан.

Зинина О.В., доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Иванов Ю.Г., доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Ишевский А.Л., доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия.

Калинина И.В., доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Кузнецова Е.А., доктор технических наук, доцент, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия.

Максимова С.Н., доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, г. Владивосток, Россия.

Резниченко И.Ю., доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный аграрный университет им. В.Н. Полецов, г. Кемерово, Россия.

Семенова А.А., доктор технических наук, профессор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Россия.

Сибирев А.В., доктор технических наук, профессор, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия.

Третьяк Л.Н., доктор технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия.

Трояновская И.П., доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия.

Хатко З.Н., доктор технических наук, доцент, Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп, Россия.

Чернопольская Н.Л., доктор технических наук, доцент, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, г. Омск, Россия.

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ:

Баутин В.М., доктор экономических наук, профессор, академик РАН, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

Гордеев А.В., доктор экономических наук, профессор, академик РАН, г. Москва, Россия.

Гусаков В.Г., доктор экономических наук, профессор, академик Национальной академии наук, г. Минск, Беларусь.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Бутко Г.П., доктор экономических наук, профессор, Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия.

Головина С.Г., доктор экономических наук, профессор, Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Россия.

Кузьменко В.В., доктор экономических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия.

Пенькова И.В., доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия.

Попова Е.В., доктор экономических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия.

Рамазанов И.А., доктор экономических наук, доцент, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва, Россия.

4 · 2026

Agrarnaya nauka

Том 405, номер 4, 2026

Volume 405, number 4, 2026

ISSN 0869-8155 (print)

ISSN 2686-701X (online)

© journal «Agrarian science»

© authors

Copyright © 2024 This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), allowing third parties to copy and redistribute the material in any medium or format and to remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially, provided the original work is properly cited and states its license.



DOI журнала 10.32634/0869-8155

The journal is included in the list of leading scientific journals and editions peer-reviewed by Higher Attestation Commission (directive of the Ministry of Education and Science № 21-p by 12 February 2019), in the AGRIS database (Agricultural Research Information System) and in the system of Russian index of scientific citing (RSCI).

Full version is available by the link <http://elibrary.ru>

The journal is a member of the Association of science editors and publishers. Each article is assigned a number Digital Object Identifier (DOI).

Founder: Limited liability company "VIC Animal Health"

Senior editor Kostromicheva I.V.

Executive editor Dolgaya M.N.

Design and layout Antonov S.N.

Bibliographer Neroznik D.S.

Journalist Sedova Yu.G.

Legal address: 107053, Russian Federation, Moscow, Sadovaya Spasskaya, 20

Postal address: 109147, Russian Federation, Moscow, 3 Marxistskaya St., 2 building

Editorial phone +7 (916) 616-05-31

agrovetpress@inbox.ru

Websites: www.vetpress.ru

<https://agrarnayanauka.ru>

Advertising: +7 (927) 155-08-10

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media Certificate PI No. FS 77-76484 dated August 02, 2019. You can subscribe to the journal at any post office.

You can subscribe to the print magazine:

— in the editorial office by phone.

+7 (495) 777-67-67, ext. 1453,

agrovetpress@inbox.ru

— in the subscription agency Ural-Press Okrug

LLC — <https://www.ural-press.ru/catalog/>

Free subscription to the electronic version of the

magazine — <https://agrarnayanauka.ru>

Subscription to archived issues and individual

articles:

— on the website of the Scientific editorial staff

<https://www.vetpress.ru/jour>

— on the website of the Scientific Electronic Library

www.elibrary.ru

The circulation of 2000 copies.

Signed in print 13.04.2026

Release date 20.04.2026

The journal is printed in the printing house of LLC «Poly Print Service», 127015, Moscow, Butyrskaya Street, 86

АГРАРНАЯ АGRARIAN НАУКА SCIENCE

Scientific-theoretical and production journal coming out once a month.

The journal is edited since October 1956, first under the name "Agricultural science's bulletin". Since 1992 the journal is named "Agrarian science".

Publisher:

Autonomous non-commercial organisation "Agrarian science" edition"
107053, Russia, Moscow, st. Sadovaya-Spasskaya, 20.

EDITOR-IN-CHIEF

Violin B.V., Candidate of veterinary science, Leading Researcher of All-Russian Scientific Research Institute for Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plant — a branch of the Federal Scientific Centre VIEV, Moscow, Russia.

Deputy Editor-in-Chief

Rebezov M.B., Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor, V.M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

THE EDITORIAL BOARD

ZOOTECHNICS AND VETERINARY MEDICINE

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

Abbas R.Z., PhD, Associate Professor, University of Agriculture, Faisalabad, Faisalabad, Pakistan.

Ansori A.N.M., PhD, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia.

Fisinin V.I., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research and Technological Institute of Poultry Farming of the Russian Academy of Sciences, Sergiev Posad, Russia.

Javanmard M., Doctor of Veterinary Medicine, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran.

Koshchaev A.G., Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia.

Panin A.N., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Podobed L.I., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Animal Husbandry of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

Usha B.V., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Vasilevich F.I., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA by K.I. Skryabin, Moscow, Russia.

Yatusevich A.I., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Vitebsk Order of the Badge of Honor State Academy of Veterinary Medicine, Vitebsk, Belarus.

Yuldashbaev Yu.A., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.

Zaits J., Doctor of Veterinary Sciences, University of Veterinary Medicine and Pharmacy in Brno, Brno, Czech Republic.

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Abdurasulov A.Kh., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan.

Abilov A.I., Doctor of Biological Sciences, Professor, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Moscow Region, Russia.

Aknazarov B.K., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Skryabin, Bishkek, Kyrgyzstan.

Aliev A.Yu., Doctor of Veterinary Sciences, Caspian Regional Research Veterinary Institute, Makhachkala, Russia.

Andreeva A.V., Doctor of Biological Sciences, Professor, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.

Derkho M.A., Doctor of Biological Sciences, Professor, South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia.

Gorelik O.V., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.

Gritsenko S.A., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia.

Kolesnik E.A., Doctor of Biological Sciences, Federal State University of Education, Moscow, Russia.

Kontsevaya S.Yu., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Kosilov V.I., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia.

Loretts O.G., Doctor of Biological Sciences, Professor, Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.

Lysenko Yu.A., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.

Mironova I.V., Doctor of Biological Sciences, Professor, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.

Nekrasov R.V., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Russia.

Pozyabin S.V., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — MVA by K.I. Skryabin, Moscow, Russia.

Radchikov V.F., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Scientific and Practical Center for Animal Husbandry of the National Academy of Sciences of Belarus, Zhodino, Belarus.

Rustamova S.I., PhD, Veterinary Research Institute under the Ministry of Agriculture of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan.

Semenov V.G., Doctor of Biological Sciences, Professor, Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia.

Shcherbakov P.N., Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia.

Sotnikova L.F., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Stepanova M.I., Doctor of Biological Sciences, Professor, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Topuria L.Yu., Doctor of Biological Sciences, Professor, Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia.

The journal is designed to advance Russian and world agrarian science, promotes innovative technologies' development. Our main goals consist in supporting young scientists, highlight scientific researches and best agricultural practices.

The scientific concept of the publication involves the publication of modern achievements in the agricultural sector, the results of key national and international studies.

The journal "Agrarian Science" contributes to the generalization of practical achievements in the field of agriculture and improves the scientific and practical qualifications in the area.

Both Russian and foreign authors are invited to publication.

For reprinting of materials the references to the journal are obligatory. The opinions expressed by the authors of published articles may not coincide with those of the editorial team. Advertisers carry responsibility for the content of their advertisements.

16+

AGRONOMY

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

Ntsomboh-Ntsefong G., PhD, University of Yaoundé I, Yaounde, Cameroon.

Juraev M.Ya., PhD, Associate Professor, Andijan Institute of Agriculture and Agrotechnologies, Andijan, Uzbekistan.

Nasiev B.N., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan.

Thiruvengadam M., PhD, Konkuk University, Seoul, South Korea.

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Bunin M.S., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Central Scientific Agricultural Library, Moscow, Russia.

Dolzhenko T.V., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Saint-Petersburg state agrarian university, Pushkin, St. Petersburg, Russia.

Dragavtseva I.A., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, North Caucasian Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture and Winemaking, Krasnodar, Russia.

Grichanov I.Ya., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, All-Russian Research Institute of Plant Protection, Pushkin, Russia.

Islamgulov D.R., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.

Jalilov F.S., Doctor of Biological Sciences, Professor, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.

Kalmykova E.V., Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Aforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia.

Kazakhmedov R.E., Doctor of Biological Sciences, North Caucasian Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, Winemaking, Derbent, Russia.

Nikitin S.N., Doctor of Agricultural Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture named after N. S. Nemtsev, Ulyanovsk, Russia.

Zeynalov A.S., Doctor of Biological Sciences, Federal Scientific Selection and Technological Center for Horticulture and Nursery, Moscow, Russia.

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

Afrasyab Kh., Doctor of Fluid Mechanics and Fluid engineering Machinery, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia.

de Souza K.C., PhD, Blumenau Regional University, Blumenau, Brazil.

Fawzi M.M., PhD, Professor, University of Mauritius, Reduit, Mauritius.

Khan M.U., PhD., Faisalabad Agricultural University, Faisalabad, Pakistan.

Kuznetsova O.A., Doctor of Technical Sciences, V.M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Mironescu M., Doctor in Industrial Engineering, Professor Eng., University Lucian Blaga of Sibiu, Sibiu, Romania.

Sarkar T., PhD, Malda Polytechnic Institute, Malda, India.

Slozhenkina M.I., Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Volga Region Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russia.

Smaoui S., PhD, University of Sfax, Sfax, Tunisia.

Zengin G., PhD, Professor, Selcuk University, Seljuk-Konya, Turkey.

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Al-Suhaimi S. A., PhD, Professor City of Scientific Research and Technological Applications (SRTA-City) New Borg El-Arab, Alexandria, Egypt

Babich O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Briukhanov A.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agroengineering and Environmental Problems (branch), Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia.

Chernopolskaya N.L., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia.

Ishevsky A.L., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia.

Ivanov Yu.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.

Kalinina I.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Khatko Z.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Maikop State Technological University, Maikop, Russia.

Kuznetsova E.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Maksimova S.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia.

Mammadov G.B., Doctor of Technical Sciences, Professor Azerbaijan State Agrarian University, Ganja, Azerbaijan.

Reznichenko I.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuzbass State Agrarian University named after V.N. Poletskov, Kemerovo, Russia

Semenova A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, V.M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Sibirev A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal Scientific Agroengineering Center of VIM, Moscow, Russia.

Suychinov A.K., PhD, Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry, Almaty, Kazakhstan.

Tretyak L.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia.

Troyanovskaya I.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia.

Yessimbekov Zh.S., PhD, Kazakh Research Institute of Processing and Food Industry, Almaty, Kazakhstan.

Zinina O.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

Bautin V.M., Doctor of Economics, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.

Gordeev A.V., Doctor of Economics, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Gusakov V.G., Doctor of Economics, Professor, Academician of the National Academy of Sciences, Minsk, Belarus.

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Butko G.P., Doctor of Economics, Professor, Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia.

Golovina S.G., Doctor of Economics, Professor, Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.

Kuzmenko V.V., Doctor of Economics, Professor, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russia.

Penkova I.V., Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

Popova E.V., Doctor of Economics, Professor, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia.

Rakhmetova R.U., Doctor of Economics, Professor, University of Turan, Astana, Kazakhstan.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕТЕРИНАРИЯ

- Меликова Ю.Н., Виолин Б.В.* Клинически значимые молекулярные мутации опухолей у собак и кошек: современное состояние диагностики, прогностической оценки и таргетной терапии: научный обзор 8
- Шнякина Т.Н., Щербаков П.Н., Степанова К.В.* Экспериментальное исследование применения сетчатых имплантатов при промежностных грыжах у лабораторных животных 20
- Лукин А.А., Вебер А.Л., Исригова Т.А., Жиарно М.* Негативное воздействие микропластика на здоровье сельскохозяйственных животных и качество продукции животноводства 29

ЗООТЕХНИЯ

- Касанова Н.Р., Гайнуллина М.К., Просвирников Д.Б., Тунцев Д.В., Крупин Е.О., Салыхов А.Ш., Якимов О.А., Головкова Е.Е.* Влияние кормовой добавки на основе биомассы дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* на яичную продуктивность перепелов 45
- Ермолова Е.М., Ермолов С.М., Максимова Р.А., Косилов В.И., Юлдашбаев Ю.А., Никонова Е.А., Калякина Р.Г., Раджабов Ф.М., Долгая М.Н.* Продуктивность и физико-химические свойства молока при использовании в рационе коров кормовых добавок 55
- Абдельманова А.С., Чинаров Р.Ю., Родионов А.Н., Сермягин А.А., Прожерин В.П.* Характеристика аллелофонда быков-производителей холмогорской породы как потенциальных доноров семени для использования в программах сохранения генетических ресурсов 64

АГРОНОМИЯ

- Иванова А.Ю., Лесик Е.В.* Эффективность предпосевной обработки семян растений рода *Pennisetum* Rich. стимуляторами роста 72
- Иванисова А.С., Марченко Д.М., Иванисов М.М., Подгорный С.В., Кравченко Н.С.* Основные показатели качества зерна перспективных линий озимой твердой пшеницы 80
- Тулинов А.Г., Королева М.П.* Изучение площади листовой поверхности, содержания фотосинтетических пигментов в листьях и урожайности картофеля сорта Печорский на фоне различных доз минеральных удобрений 86
- Рехман З.А., Блинов А.В., Нагдалян А.А., Аскерова А.С., Голик Д.Б., Ребезов М.Б.* Исследование влияния предпосевной обработки семян пшеницы наночастицами диоксида марганца на солевой стресс 94
- Блинов А.В., Нагдалян А.А., Рехман З.А., Аскерова А.С., Голик Д.Б., Пирогов М.А., Ребезов М.Б.* Исследование влияния наноразмерного оксида кобальта на устойчивость пшеницы (*Triticum aestivum*) к температурным условиям окружающей среды 102

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Горбунова Н.А., Ребезов М.Б., Болешенко О.П., Ребезов Я.М.* Возможности использования артемии (Обзор, часть 1) 110
- Резниченко И.Ю., Егушова Е.А.* Исследование нутриентного состава мякоти тыквы как сырьевого ингредиента для продуктов питания заданного состава 120
- Кутырёв А.И., Смирнов И.Г.* Применение трансформерной архитектуры глубокого обучения (RF-DETR) для мониторинга деревьев-опылителей в рядах садовых насаждений 127
- Оськин С.П., Кузнецов А.В., Конева Н.Е.* Функциональное моделирование и параметрическая оценка компонентов IoT-системы сбора данных для задач точного земледелия 137
- Максимов А.Ф., Кутырев Г.А.* Проектирование архитектуры распределенной IoT-системы мониторинга параметров микроклимата тепличных комплексов на основе протокола MQTT и граничных вычислений 144
- Марченко Д.С.* Архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений: функциональное моделирование и верификация. 151

CONTENTS

VETERINARY MEDICINE

- Melikova Yu.N., Violin B.V.* Clinically significant molecular mutations in canine and feline tumors: roles in diagnosis, prognostic assessment, and targeted therapy 8
- Shnyakina T.N., Shcherbakov P.N., Stepanova K.V.* Experimental study of the use of mesh implants in perineal hernias in laboratory animals 20
- Lukin A.A., Veber A.L., Isrigova T.A., Ziarno M.* Negative impact of microplastics on the health of farm animals and the quality of livestock products..... 29

ZOOTECHNICS

- Kasanova N.R., Gainullina M.K., Prosvirnikov D.B., Tuntsev D.V., Krupin E.O., Salakhov A.S., Yakimov O.A., Golovkova E.E.* The effect of feed additive based on the yeast biomass *Rhodospiridium diobovatum* on egg production of quails..... 45
- Ermolova E.M., Ermolov S.M., Maksimova R.A., Kosilov V.I., Yuldashbaev Yu.A., Nikonova E.A., Kalyakina R.G., Rajabov F.M., Dolgaya M.N.* Productivity and physicochemical properties of milk when using feed additives in the diet of cows 55
- Abdelmanova A.S., Chinarov R.Yu., Rodionov A.N., Sermyagin A.S., Prozherin V.P.* Characteristics of allele pool of Kholmogor bulls as potential donors of semen for use in programs of conservation of genetic resources 64

AGRONOMY

- Ivanova A.Yu., Lesik E.V.* Effectiveness of pre-sowing treatment of seeds of plants of the genus *Pennisetum* Rich. with growth stimulants 72
- Ivanisova A.S., Marchenko D.M., Ivanisov M.M., Podgorny S.V., Kravchenko N.S.* Main grain quality indicators of promising winter durum wheat lines 80
- Tulinov A.G., Koroleva M.P.* Study of leaf surface area, content of photosynthetic pigments in leaves and yield of Pechorsky potato variety under different doses of mineral fertilizers 86
- Rekhman Z.A., Blinov A.V., Nagdalyan A.A., Askerova A.S., Golik D.B., Rebezov M.B.* Study of the effect of pre-sowing treatment of wheat seeds with manganese dioxide nanoparticles on salt stress 94
- Blinov A.V., Nagdalyan A.A., Rekhman Z.A., Askerova A.S., Golik D.B., Pirogov M.A., Rebezov M.B.* Study of the effect of nanosized cobalt oxide on the resistance of wheat (*Triticum aestivum*) to environmental temperature conditions 102

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

- Gorbunova N.A., Rebezov M.B., Boleshenko O.P., Rebezov Ya.M.* Possibilities of using Artemia (Review, Part 1) 110
- Reznichenko I.Yu., Egushova E.A.* Study of the nutrient composition of pumpkin pulp as a raw ingredient for food products of a specified composition 120
- Kutyrev A.I., Smirnov I.G.* Application of the deep learning transformer architecture (RF-DETR) for monitoring pollinator trees in orchard rows 127
- Oskin S.P., Kuznetsov A.V., Koneva N.E.* Functional modeling and parametric evaluation of components of an IoT data collection system for precision agriculture 137
- Maksimov A.F., Kutyrev G.A.* Design of a distributed IoT system architecture for greenhouse microclimate monitoring based on MQTT protocol and edge computing 144
- Marchenko D.S.* Architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities: functional modeling and verification 151

УДК 619:616-006:636

Научный обзор



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-8-19

Ю.Н. Меликова¹ ✉

Б.В. Виолин²

¹ ООО «Новые ветеринарные технологии» (ООО «НьюВетТех»), Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии — филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.П. Коваленко Российской академии наук», Москва, Россия

✉ melikova.u@newvettech.ru

Поступила в редакцию: 01.03.2026

Одобрена после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 28.03.2026

© Меликова Ю.Н., Виолин Б.В.

Review



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-8-19

Yuliya N. Melikova¹ ✉

Boris V. Violin²

¹ LLC “New Veterinary Technologies” (LLC “NewVetTech”), Moscow, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute for Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plant — a branch of the Federal Scientific Centre VIEV, Moscow, Russia

✉ melikova.u@newvettech.ru

Received by the editorial office: 01.03.2026

Accepted in revised: 15.03.2026

Accepted for publication: 28.03.2026

© Melikova Yu.N., Violin B.V.

Клинически значимые молекулярные мутации опухолей у собак и кошек: современное состояние диагностики, прогностической оценки и таргетной терапии

РЕЗЮМЕ

В последние годы молекулярная ветеринарная онкология развивается особенно активно благодаря внедрению современных методов геномного и транскриптомного анализа опухолей у животных. Мутации и сигнальные пути канцерогенеза становятся важными биомаркерами, позволяющими уточнять биологию опухолей, повышать точность диагностики, проводить прогностическую оценку и обосновывать применение таргетной терапии. Целью настоящего обзора является анализ современных данных о клинически значимых мутациях опухолей у собак и кошек и их роли в диагностике, прогностической оценке и лечении. В статье рассматриваются наиболее изученные молекулярные мишени, включая KIT, BRAF, HER2, PIK3CA и TP53, а также связанные с ними сигнальные пути опухолевого роста. Обобщены сведения о применении методов молекулярной диагностики, таких как полимеразная цепная реакция, иммуногистохимия, высокопроизводительное секвенирование и жидкостная биопсия. Особое внимание уделено значению молекулярных маркеров для сравнительной онкологии и перспективам интеграции многоомного профилирования опухолей в клиническую ветеринарную практику. Полученные данные свидетельствуют о формировании основ прецизионной ветеринарной онкологии, направленной на разработку более индивидуализированных стратегий диагностики и терапии опухолевых заболеваний у собак и кошек.

Ключевые слова: ветеринарная онкология, молекулярные биомаркеры, таргетная терапия, KIT, BRAF, HER2, PIK3CA, TP53, жидкостная биопсия

Для цитирования: Меликова Ю.Н., Виолин Б.В. Клинически значимые молекулярные мутации опухолей у собак и кошек: современное состояние диагностики, прогностической оценки и таргетной терапии: научный обзор. *Аграрная наука*. 2026; 405(04): 8–19. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-8-19>

Clinically significant molecular mutations in canine and feline tumors: roles in diagnosis, prognostic assessment, and targeted therapy

ABSTRACT

In recent years, molecular veterinary oncology has been developing rapidly due to the introduction of advanced genomic and transcriptomic methods for the analysis of tumors in animals. Mutations and oncogenic signaling pathways are becoming important biomarkers that help clarify tumor biology, improve diagnostic accuracy, enable prognostic assessment, and support the application of targeted therapy. The aim of this review is to analyze current data on clinically significant mutations in tumors of dogs and cats and their role in diagnosis, prognostic assessment, and treatment. The article discusses the most extensively studied molecular targets, including KIT, BRAF, HER2, PIK3CA, and TP53, as well as the associated signaling pathways involved in tumor development. The review also summarizes the application of molecular diagnostic methods such as polymerase chain reaction, immunohistochemistry, next-generation sequencing, and liquid biopsy. Special attention is given to the importance of molecular markers for comparative oncology and to the prospects for integrating multi-omics tumor profiling into clinical veterinary practice. These findings indicate the emergence of the foundations of precision veterinary oncology, aimed at developing more individualized strategies for the diagnosis and treatment of tumors in dogs and cats.

Key words: veterinary oncology, molecular biomarkers, targeted therapy, KIT, BRAF, HER2, PIK3CA, TP53, liquid biopsy

For citation: Melikova Yu.N., Violin B.V. Clinically significant molecular mutations in canine and feline tumors: roles in diagnosis, prognostic assessment, and targeted therapy. *Agrarian science*. 2026; 405(04): 8–19 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-8-19>

Введение/Introduction

В последние годы молекулярная ветеринарная онкология развивается особенно быстро благодаря внедрению высокопроизводительных методов геномного и транскриптомного анализа опухолей у животных. Несмотря на накопление значительного объема экспериментальных и клинических данных, информация о ключевых мутациях, их диагностическом и терапевтическом значении у собак и кошек остается фрагментированной и требует систематизации.

Ветеринарная онкология постепенно переходит к модели персонализированного выбора диагностики и лечения, в которой морфология опухоли дополняется молекулярным профилем. Однако в отличие от онкологии человека число молекулярных тестов, реально встроенных в рутинную практику у собак и кошек, пока ограничено. Большая часть опубликованных данных касается либо отдельных нозологий, либо сравнительной онкологии, либо доклинической валидации мишеней. На этом фоне особенно важно различать:

- 1) маркеры, уже влияющие на клиническое решение;
- 2) маркеры, значимые для стратификации риска и отбора в клинические исследования;
- 3) молекулярные изменения, пока сохраняющие преимущественно исследовательское значение [1–3].

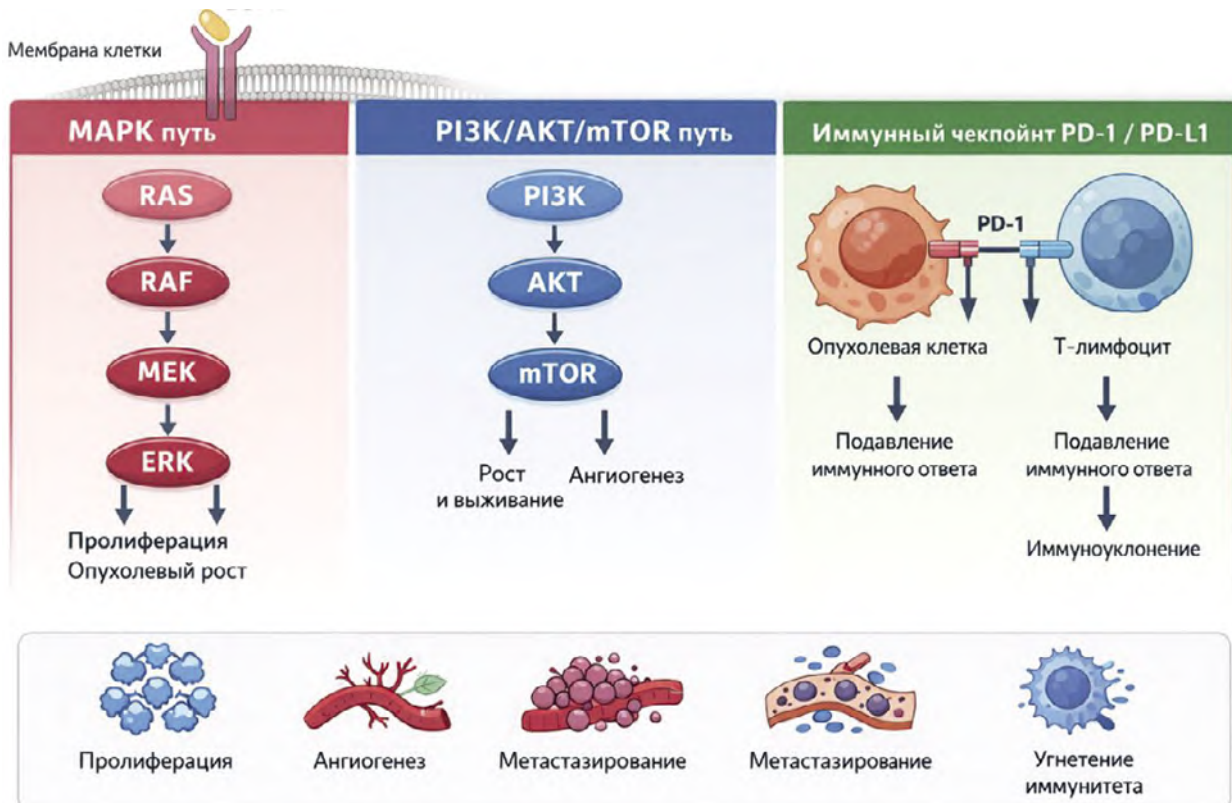
К настоящему времени наиболее убедительные примеры клинически значимой молекулярной диагностики у мелких домашних животных связаны с KIT при мастоцитоме собак и BRAF V595E при уротелиальной/простатической карциноме собак. Одновременно быстро накапливающиеся научные данные касаются HER2 при легочных карциномах собак, PIK3CA при опухолях молочной железы собак, EGFR при оральной плоскоклеточной карциноме кошек, checkpoint-маркеров при карциноме молочной железы кошек и многоомных сигнатур (multi-omics signature) при меланоме и остеосаркоме собак [1–3].

Современные исследования показывают, что канцерогенез у собак и кошек определяется нарушениями нескольких ключевых сигнальных каскадов, регулирующих клеточную пролиферацию, апоптоз, ангиогенез и взаимодействие опухоли с иммунной системой. Наиболее изученными молекулярными осями являются пути MAPK, PI3K/AKT/mTOR, сигнальный путь EGFR, а также система иммунных контрольных точек PD-1/PD-L1. Основные сигнальные механизмы опухолевого роста и иммунного уклонения представлены на рисунке 1, а ключевые молекулярные мишени и наиболее клинически значимые мутации опухолей у собак и кошек суммированы в таблицах 1 и 2.

PI3K/AKT/mTOR-путь — ключевой сигнальный путь клеточного роста и метаболизма,

Рисунок 1. Ключевые сигнальные пути опухолевого роста и иммунного EGFR уклонения (MAPK, PI3K/AKT/mTOR, EGFR, PD-1/Pb-L1)

Figure 1. Key signaling pathways of tumor growth and immune EGFR evasion (MAPK, PI3K/AKT/mTOR, EGFR, PD-1/Pb-L1)



Примечание: MAPK-путь — сигнальный каскад внутриклеточной передачи сигналов, который активируется рецепторами факторов роста и регулирует клеточную пролиферацию, дифференцировку и выживание. Классический каскад включает последовательную активацию белков RAS → RAF → MEK → ERK, что приводит к изменению экспрессии генов и стимулирует рост опухолевых клеток.

Таблица 1. Ключевые молекулярные биомаркеры опухолей у собак, кошек и человека: значение для сравнительной онкологии

Table 1. Key molecular biomarkers in tumors of dogs, cats, and humans: implications for comparative oncology

Молекулярная мишень	Опухоли у собак	Опухоли у кошек	Аналогичные опухоли у человека	Препараты / терапевтические подходы	Значение для сравнительной онкологии
KIT (CD117)	Мастоцитома	Мастоцитома	Гастроинтестинальная стромальная опухоль, мастоцитоз	Тоцераниб, маситиниб, иматиниб	Сходные активирующие мутации KIT позволяют использовать собак как модель для изучения ингибиторов тирозинкиназ
BRAF (V595E/V600E)	Уротелиальная карцинома	Редко описана	Меланома, колоректальный рак, рак щитовидной железы	Вемурафениб, дабрафениб	Консервативная мутация BRAF позволяет изучать таргетные ингибиторы MAPK-пути
HER2 (ERBB2)	Аденокарцинома лёгкого	Карцинома молочной железы	Рак молочной железы, рак желудка	Трастузумаб, лапатиниб, пертузумаб	Сходство HER2-позитивных опухолей у кошек и человека делает их полезной моделью
PI3K/АКТ/mTOR	Опухоли молочной железы	Карцинома молочной железы	Рак молочной железы, рак эндометрия	Алпелисиб, эверолимус, сиролимус	Общий сигнальный путь опухолевого роста у разных видов
EGFR	Опухоли лёгкого	Плоскоклеточная карцинома ротовой полости	Рак лёгкого, рак головы и шеи	Цетуксимаб, эрлотиниб, гефитиниб	Сходные механизмы активации EGFR и чувствительность к ингибиторам
PD1 / PDL1	Меланома, саркомы	Карциномы, опухоли молочной железы	Меланома, рак лёгкого, рак почки	Ниволумаб, пембролизумаб, атезолизумаб	Модель для изучения иммунотерапии и иммунных контрольных точек
TP53	Остеосаркома	Различные карциномы	Остеосаркома, рак молочной железы	Прямой таргетной терапии нет	Маркер геномной нестабильности и прогноза
VEGF / VEGFR	Остеосаркома, саркомы	Карциномы	Различные солидные опухоли	Бевацизумаб, сунитиниб, тоцераниб	Общий механизм ангиогенеза и метастазирования
JAK/STAT	Меланома	Карциномы	Гематологические и солидные опухоли	Руксолитиниб	Сходные сигнальные механизмы воспаления и пролиферации
NOTCH1	Меланома	Карциномы	Рак головы и шеи, лейкоз	Ингибиторы γ секретазы	Общий сигнальный путь дифференцировки клеток

Таблица 2. Молекулярные мутации и диагностические методы в онкологии собак и кошек

Table 2. Molecular mutations and diagnostic approaches in canine and feline oncology

Ген / молекулярная мишень	Тип опухоли	Вид животного	Основные мутации / изменения	Методы диагностики	Клиническое значение
KIT	Мастоцитома	Собаки, кошки	Активирующие мутации экзонов 8, 9, 11	ПЦР, NGS, ИГХ	Прогноз заболевания и выбор терапии ингибиторами тирозинкиназ
BRAF	Уротелиальная карцинома	Собаки	Мутация V595E	ПЦР (в том числе по моче), NGS	Диагностический маркер и потенциальная мишень таргетной терапии
HER2 (ERBB2)	Карцинома молочной железы	Кошки	Амплификация и гиперэкспрессия HER2	ИГХ, FISH, NGS	Прогностический маркер агрессивности опухоли
PIK3CA	Опухоли молочной железы	Собаки	Мутации в hotspотобластях гена	ПЦР, NGS	Активация сигнального пути PI3K/АКТ/mTOR; потенциальная терапевтическая мишень
TP53	Остеосаркома, карциномы	Собаки, кошки	Мутации гена-супрессора опухоли	NGS, ИГХ	Маркер геномной нестабильности и прогноза
EGFR	Плоскоклеточная карцинома ротовой полости	Кошки	Гиперэкспрессия рецептора	ИГХ, NGS	Потенциальная мишень таргетной терапии
PD-L1	Меланома, карциномы	Собаки, кошки	Повышенная экспрессия иммунной контрольной точки	ИГХ, RNAseq, NGS	Прогностический маркер и потенциальная мишень иммунотерапии

Примечание: ПЦР — полимеразная цепная реакция; NGS — высокопроизводительное секвенирование нового поколения; ИГХ — иммуногистохимия [37]; FISH — флуоресцентная гибридизация *in situ* [38]; RNA-seq — секвенирование РНК [39].

активируемый рецепторами факторов роста и онкогенными мутациями. Он включает последовательную активацию PI3K → АКТ → mTOR и регулирует клеточный рост, выживание, ангиогенез и метаболизм

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Работа выполнена как нарративный обзор литературы. Поиск научных публикаций осуществляли в реферативных базах данных PubMed/MEDLINE и PubMed Central, а также посредством анализа полнотекстовых версий статей, размещенных на

официальных сайтах издательств. В обзор включали публикации на английском языке, посвященные мутациям, молекулярным биомаркерам, жидкостной биопсии и таргетной терапии у собак и кошек с опухолями. Основной временной фокус поиска — 2020–2025 гг., однако для клинически ключевых молекулярных осей дополнительно включали ранние оригинальные работы, заложившие диагностическую и терапевтическую основу, например, исследования по BRAF V595E и HER2. Поисковые запросы включали комбинации терминов: canine oncology, feline oncology, molecular biomarkers, KIT, BRAF V595E, HER2, PIK3CA,

EGFR, oral melanoma, osteosarcoma, liquid biopsy, urothelial carcinoma, mast cell tumor, mammary tumor [1–3].

Критериями включения были: обзорные статьи, оригинальные исследования, ретроспективные серии, молекулярно-генетические и транскриптомные исследования, работы по предиктивным и прогностическим биомаркерам. Исключали нерелевантные публикации, работы без прямой связи с онкологией собак и кошек, а также исследования, не дававшие данных о клинической, диагностической или биологической значимости молекулярной мишени. Приоритет отдавали обзорам последних лет, работам с клинической валидацией и исследованиям, опубликованным в рецензируемых журналах; одна работа по жидкостной биопсии включена как preprint из-за ее высокой методологической значимости для обсуждаемой темы и явного статуса пред-публикации [1–3, 30].

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Основные методы молекулярной диагностики, применяемые в ветеринарной онкологии, их принципы, преимущества и ограничения представлены в таблице 3.

1. KIT при мастоцитоме собак и кошек

Наиболее клинически отработанной молекулярной мишенью в ветеринарной онкологии остается KIT при мастоцитоме собак. Активирующие изменения KIT и аномальная локализация/экспрессия белка ассоциируются с агрессивностью мастоцитомы собак и ее биологическим поведением. Современные данные подтверждают связь нарушений KIT с ответом на ингибиторы тирозинкиназ, прежде всего toceranib и masitinib [3–6].

В работе D. De Biase *и соавт.* показано, что патологические паттерны KIT-экспрессии ассоциированы с более неблагоприятными показателями выживаемости и безрецидивного течения у собак, получавших тирозинкиназные ингибиторы [3]. Дополнительно в 2024 году был расширен спектр известных вариаций KIT в клетках мастоцитарных опухолях собак за счет анализа кодирующих микросателлитных участков, а в 2025 году показано, что генотип с-KIT (экзон 11) может быть предсказан по морфологическим признакам опухоли с использованием методов искусственного интеллекта [4, 5]. С клинической точки зрения это усиливает представление о KIT как о тераностическом маркере, хотя его практическая интерпретация по-прежнему должна опираться на совокупность морфологии, стадии, митотической активности и статуса лимфатических узлов [3–6].

Для практики это означает, что KIT у собак следует рассматривать не только как патогенетическую ось, но и как один из немногих реально предиктивных маркеров, позволяющих обосновывать применение Toseranib или Masitinib.

У кошек KIT-дисрегуляция также важна при мастоцитарных опухолях, но клинические алгоритмы ее использования менее стандартизированы, чем у собак [1].

2. BRAF V595E при уротелиальной и простатической карциноме собак

Это, вероятно, лучший пример молекулярного теста, который реально изменил диагностику в ветеринарии. Мутация BRAF V595E — собачий аналог человеческой BRAF V600E — выявляется у значительной доли собак с уротелиальной карциномой и частью карцином простаты.

Таблица 3. Методы молекулярной диагностики в ветеринарной онкологии: преимущества и ограничения
Table 3. Molecular diagnostic methods in veterinary oncology: advantages and limitations

Метод	Основной принцип	Тип анализируемого материала	Преимущества	Ограничения	Примеры применения в ветеринарной онкологии
ПЦР (PCR)	Аmplification специфических участков ДНК	Опухолевая ткань, кровь, моча	Высокая чувствительность; относительно низкая стоимость; быстрый результат	Анализирует ограниченное число мутаций; требуется предварительное знание мутации	Выявление мутации BRAF V595E при уротелиальной карциноме собак; мутации KIT при мастоцитоме
Цифровая капельная ПЦР (ddPCR)	Разделение образца на тысячи капель с независимой ПЦР-амплификацией	Опухолевая ткань, плазма крови, моча	Очень высокая чувствительность; количественное определение мутаций; подходит для жидкостной биопсии	Ограниченный набор анализируемых мишеней; высокая стоимость оборудования	Мониторинг мутаций BRAF в циркулирующей опухолевой ДНК
Секвенирование нового поколения (NGS)	Параллельное секвенирование большого числа фрагментов ДНК	Опухолевая ткань, формалинфиксированные образцы, кровь	Позволяет анализировать множество генов одновременно; выявляет новые мутации	Высокая стоимость; сложность биоинформатического анализа	Геномное профилирование остеосаркомы собак; выявление мутаций TP53, SETD2, PIK3CA
RNAseq	Секвенирование РНК для анализа экспрессии генов	Свежая опухолевая ткань, клеточные линии	Позволяет изучать транскриптом и сигнатуры экспрессии генов	Требуется высококачественной РНК; сложный анализ данных	Изучение транскриптомных сигнатур оральной меланомы собак
Жидкостная биопсия	Анализ циркулирующей опухолевой ДНК или клеток в биологических жидкостях	Кровь, моча, плазма	Минимально инвазивный метод; возможность мониторинга терапии	Низкая концентрация опухолевой ДНК; требуется высокочувствительная методика	Диагностика уротелиальной карциномы собак по мутации BRAF в моче

Еще в 2015 году была показана высокая чувствительность ddPCR-анализа мочи для неинвазивного выявления этой мутации при *canine urothelial carcinoma* и *prostate carcinoma* [7]. Позднее клиническая применимость оси BRAF была существенно укреплена иммуногистохимической и ретроспективной диагностической валидацией [8–10].

Работа L. Aeschlimann и соавт. 2024 года показала почти полную конкордантность между методами иммуногистохимии и droplet digital PCR (ddPCR) при детекции мутантного белка BRAF в уротелиальных и простатических карциномах собак [8]. В 2025 году ретроспективный анализ 8365 диагностических образцов продемонстрировал, что BRAF-тестирование фактически стало рутинным диагностическим методом, особенно для образцов мочи, направляемых при подозрении на уротелиальную карциному [9]. Параллельно развиваются более доступные варианты молекулярного скрининга, включая conventional PCR для жидких образцов и исследование мочевых microRNA-панелей [10]. Следовательно, BRAF V595E — это уже не только сравнительно-биологическая находка, а полноценный клинический молекулярный маркер, имеющий диагностическое и потенциально терапевтическое значение [7–10].

В случае выявления мутации BRAF V595E и подтверждения уротелиальной карциномой назначают Piroxicam или Piroxicam + Mitoxantrone, реже Meloxicam или Deracoxib [31].

3. HER2/ERBB2 при легочных карциномах собак

Для первичных легочных карцином собак одной из наиболее перспективных молекулярных осей является HER2/ERBB2. В 2019 году были описаны рецидивирующие активирующие мутации HER2 при легочных карциномах собак [11]. Более поздняя работа 2024 года подтвердила, что при легочных карциномах собак релевантны не только мутации, но также гиперэкспрессия и амплификация HER2 [12]. Современный обзор 2025 года рассматривает HER2 как одну из ключевых будущих мишеней при неоперабельных формах легочного рака собак [13].

Практическое значение HER2 при легочных опухолях собак пока ограничено отсутствием стандартизированной anti-HER2 терапии, сопоставимой с человеческой онкологией. Тем не менее само наличие молекулярно очерченной HER2-позитивной подгруппы уже влияет на концепцию диагностики и на отбор случаев для прецизионного профилирования [11–13].

4. PIK3CA и путь PI3K/AKT/mTOR при опухолях молочной железы собак

Для опухолей молочной железы собак одним из наиболее воспроизводимых генетических драйверов является PIK3CA. В работе 2023 года показано, что PIK3CA — наиболее часто мутирующий ген в исследованной когорте опухолей молочной железы собак, причем hotspot-мутации

гомологичны человеческим [15]. В 2024 году была продемонстрирована возможность чувствительного выявления PIK3CA hotspot-мутаций методом droplet digital PCR в ткани и при liquid biopsy [16]. Экспериментальные данные 2023 года также показали более выраженный противоопухолевый эффект alpelisib в клеточных линиях опухолей молочной железы собак с мутацией гена PIK3CA [17].

Таким образом, сигнальный путь PI3K/AKT/mTOR при опухолях молочной железы у собак выходит за пределы описательной молекулярной патологии и рассматривается как перспективная основа для разработки терапевтических стратегий, основанных на использовании молекулярных биомаркеров. Значимость данного направления подтверждается современными обзорными исследованиями, посвященными молекулярным механизмам опухолей молочной железы у собак, а также нарушениям сигнальных путей при опухолях молочной железы у собак и трижды негативном раке молочной железы у человека. [14, 18].

5. Молекулярные маркеры при опухолях молочной железы кошек

Карцинома молочной железы у кошек сохраняет значение как одна из наиболее агрессивных опухолей данного вида и рассматривается как сравнительная модель HER2-положительного рака молочной железы. В современном обзоре 2025 года систематизированы данные о классификации, системах гистологической градации и прогностических факторах опухолей молочной железы у кошек [19]. Дополнительный интерес представляют иммунные контрольные точки: в 2025 году была показана экспрессия молекул PD-1, PD-L1 и PD-L2 в редких гистологических типах опухолей молочной железы у кошек, что усиливает интерес к блокаде иммунных контрольных точек как перспективному направлению терапии [20].

Несмотря на то, что указанные иммунные маркеры пока не нашли широкого применения в рутинной иммунной терапии опухолей молочной железы у кошек, накопленные данные свидетельствуют об их потенциальной клинической значимости. В частности, экспрессия молекул PD-1, PD-L1 и PD-L2 выявляется как в опухолевых клетках, так и в инфильтрирующих опухоль иммунных клетках, что указывает на возможную роль механизмов иммунного уклонения в прогрессировании данного заболевания [20]. Кроме того, современные обзорные исследования подчёркивают, что молекулярные и иммуногистохимические характеристики опухолей молочной железы у кошек могут использоваться для уточнения прогноза заболевания и стратификации пациентов по риску неблагоприятного течения [19]. В этой связи изучение экспрессии иммунных контрольных точек рассматривается как перспективное направление для разработки новых терапевтических подходов, включая применение ингибиторов контрольных точек иммунного ответа и других методов иммунотерапии [19, 20].

Таблица 4. Молекулярные маркеры опухолей собак и кошек: диагностическое, прогностическое и терапевтическое значение**Table 4. Molecular markers in canine and feline tumors: diagnostic, prognostic, and therapeutic significance**

Молекулярный маркер	Тип опухоли	Вид животного	Диагностическое значение	Прогностическое значение	Терапевтическое значение
KIT	Мастоцитомы	Собаки, кошки	Выявление мутаций KIT подтверждает молекулярный подтип опухоли	Мутации KIT ассоциированы с более агрессивным течением заболевания	Используются ингибиторы тирозинкиназ (тоцераниб, маситиниб)
BRAF (V595E)	Уротелиальная карцинома	Собаки	Диагностика опухоли по мутации BRAF (в том числе по образцам мочи)	Мутация связана с особенностями биологии опухоли	Потенциальная мишень для ингибиторов BRAF (исследовательские подходы)
HER2 (ERBB2)	Карцинома молочной железы	Кошки	Определение гиперэкспрессии HER2	Ассоциирована с агрессивным течением опухоли	Потенциальная мишень таргетной терапии (антиHER2 препараты)
PIK3CA	Опухоли молочной железы	Собаки	Выявление мутаций гена в опухолевой ткани	Связана с активностью сигнального пути PI3K/AKT/mTOR	Перспективная мишень ингибиторов PI3K и mTOR
EGFR	Плоскоклеточная карцинома ротовой полости	Кошки	Определение гиперэкспрессии рецептора	Может коррелировать с агрессивностью опухоли	Потенциальная мишень антиEGFR терапии
PDL1	Меланома, карциномы	Собаки, кошки	Определение экспрессии иммунной контрольной точки	Связана с иммунным микроокружением опухоли	Перспективная мишень иммунотерапии
TP53	Остеосаркома, различные карциномы	Собаки, кошки	Выявление мутаций гена супрессора опухоли	Связана с геномной нестабильностью и прогнозом	Используется для биологической стратификации опухоли

6. Рецептор эпидермального фактора роста и молекулярные особенности плоскоклеточной карциномы ротовой полости у кошек

Плоскоклеточная карцинома ротовой полости у кошек остается одной из наиболее агрессивных и неблагоприятных по прогнозу опухолей данного вида. Современные исследования показывают, что развитие и прогрессирование этой опухоли сопровождаются нарушениями ряда ключевых молекулярных механизмов. В частности, обзор 2025 года подчеркивает значимость изменений в сигнальных путях, связанных с рецептором эпидермального фактора роста (EGFR), белком-супрессором опухолевого роста p53 (TP53), рецепторами сосудистого эндотелиального фактора роста (VEGFR), а также компонентами сигнальных каскадов JAK/STAT и PI3K/AKT/mTOR, участвующих в регуляции клеточной пролиферации, выживаемости клеток и ангиогенеза [21].

Экспериментальные исследования подтверждают функциональную роль этих молекулярных механизмов в патогенезе заболевания. Так, в 2022 году было показано, что моноклональное антитело цетуксимаб, блокирующее рецептор эпидермального фактора роста, способно подавлять активацию сигнального пути EGFR, снижать пролиферативную активность и жизнеспособность клеток плоскоклеточной карциномы ротовой полости у кошек в условиях клеточной культуры [22]. Эти данные указывают на потенциальную чувствительность опухолевых клеток к препаратам, направленным на ингибирование EGFR-зависимых сигнальных путей.

Дополнительные сведения о молекулярных механизмах заболевания были получены в исследованиях, основанных на современных геномных технологиях. В 2023 году были опубликованы результаты секвенирования полного экзона

и анализа транскриптома опухолей ротовой полости у кошек, позволившие охарактеризовать спектр генетических изменений и особенности экспрессии генов, связанных с регуляцией клеточного цикла, апоптоза, воспалительных реакций и взаимодействия опухолевых клеток с микроокружением [23]. Полученные данные свидетельствуют о значительной молекулярной гетерогенности данной опухоли и подтверждают участие нескольких сигнальных путей в ее патогенезе.

Таким образом, рецептор эпидермального фактора роста и связанные с ним сигнальные механизмы рассматриваются как одна из наиболее перспективных молекулярных мишеней для разработки новых терапевтических подходов при плоскоклеточной карциноме ротовой полости у кошек. Однако внедрение таргетной терапии в клиническую практику пока ограничено доклиническими исследованиями и требует дальнейшей экспериментальной и клинической валидации [21–23].

7. Молекулярные особенности оральной меланомы у собак и ее значение в сравнительной онкологии

Оральная меланома у собак является одной из наиболее агрессивных злокачественных опухолей данного вида и характеризуется выраженной склонностью к локально-инвазивному росту и раннему метастазированию, преимущественно в регионарные лимфатические узлы и легкие. Неблагоприятное клиническое течение заболевания и высокая частота рецидивов после хирургического лечения обусловили значительный интерес к изучению молекулярных механизмов опухолевого роста и поиску новых терапевтических мишеней. В последние годы оральная меланома собак рассматривается как молекулярно сложная опухоль, в патогенезе которой важную роль играют

не только отдельные генетические изменения, но и комплексные нарушения регуляции клеточных сигнальных путей, а также особенности взаимодействия опухолевых клеток с иммунным микроокружением.

Современные исследования, основанные на методах транскриптомного профилирования, показали, что оральная меланома у собак характеризуется выраженной молекулярной гетерогенностью. В исследовании 2024 года, посвященном анализу иммунного микроокружения первичной оральной меланомы у собак, были выявлены существенные различия между локализованными и метастазирующими опухолями. В частности, показано, что развитие метастатического процесса ассоциировано с изменениями экспрессии генов VEGFA, PTGS2 (COX-2), PD-1, PD-L1, IDO2 и ряда других молекул, участвующих в регуляции ангиогенеза, воспалительных реакций и механизмов иммунного уклонения опухоли. Полученные данные свидетельствуют о важной роли иммунорегуляторных механизмов и опухолевого микроокружения в прогрессировании заболевания [24].

Дополнительные сведения о молекулярных особенностях данной опухоли были получены в исследованиях полного транскриптома. В работе 2024 года были выявлены молекулярные сигнатуры, ассоциированные с чувствительностью опухоли к лучевой терапии и клиническим исходом заболевания. Анализ экспрессии генов показал участие сигнальных путей, регулирующих клеточный цикл, процессы клеточной адгезии, взаимодействие опухолевых клеток с внеклеточным матриксом, а также различные компоненты противоопухолевого иммунного ответа. Эти результаты подтверждают, что биологическое поведение оральной меланомы определяется совокупностью молекулярных факторов, включая генетические изменения, особенности экспрессии генов и характеристики опухолевого микроокружения [25].

Значительный вклад в понимание генетической структуры заболевания внесли исследования, основанные на секвенировании полного экзоста опухоли. В результате таких исследований были выявлены мутации в генах EP300, FAT4, JAK3, LRP1B, NCOR1, NOTCH1 и ряде других генов, связанных с регуляцией транскрипции, межклеточного сигнального обмена и дифференцировки клеток. Примечательно, что часть выявленных генетических нарушений совпадает с мутациями, описанными при меланоме человека, что указывает на сходство молекулярных механизмов опухолевого роста у различных видов [26].

Совокупность этих данных свидетельствует о том, что оральная меланома у собак характеризуется сложной молекулярной организацией, включающей изменения в нескольких сигнальных путях и компонентах опухолевого микроокружения. В связи с этим в современных исследованиях все большее значение приобретает комплексное

молекулярное профилирование опухолей, позволяющее учитывать совокупность генетических, транскриптомных и иммунологических характеристик заболевания. Такой подход может способствовать более точной стратификации пациентов по прогнозу и повышению эффективности противоопухолевой терапии.

Следует отметить, что оральная меланома собак рассматривается как одна из наиболее информативных моделей меланомы человека в рамках сравнительной онкологии. Это обусловлено сходством клинического течения заболевания, высокой склонностью к метастазированию и близостью молекулярных механизмов опухолевого роста. У собак и человека выявляются сходные нарушения сигнальных путей, регулирующих клеточную пролиферацию, ангиогенез и взаимодействие опухоли с иммунной системой. Благодаря этому оральная меланома собак активно используется в качестве биологической модели для изучения патогенеза меланомы и разработки новых терапевтических подходов, включая таргетную терапию и методы иммуномодулирующего лечения.

8. Молекулярные особенности остеосаркомы у собак и ее значение в сравнительной онкологии

Остеосаркома у собак является одной из наиболее распространенных злокачественных опухолей костной ткани и характеризуется высокой степенью агрессивности, выраженной склонностью к раннему метастазированию и значительной молекулярной гетерогенностью. Наиболее часто опухоль развивается у крупных и гигантских пород собак и преимущественно поражает метафизы длинных трубчатых костей. Несмотря на развитие хирургических и химиотерапевтических методов лечения, прогноз при данной опухоли остается неблагоприятным, что обуславливает необходимость углубленного изучения молекулярных механизмов ее развития.

Современные геномные исследования показывают, что остеосаркома у собак характеризуется выраженной геномной нестабильностью, включающей многочисленные хромосомные перестройки, изменения числа копий генов и нарушения регуляции клеточного цикла. Транскриптомные исследования последних лет позволили выделить молекулярные подтипы опухоли и определить прогностические генные сигнатуры, имеющие значение как для ветеринарной медицины, так и для изучения остеосаркомы человека [27]. Установлено, что различные молекулярные подтипы опухоли могут различаться по активности сигнальных путей, связанных с клеточной пролиферацией, регуляцией апоптоза, ремоделированием внеклеточного матрикса и иммунным ответом.

Одними из наиболее часто нарушаемых генов при остеосаркоме у собак являются TP53 и SETD2, участвующие в поддержании геномной стабильности, регуляции транскрипции и репарации

повреждений ДНК. Кроме того, выявлены изменения в ряде других генов, связанных с контролем клеточного цикла, дифференцировкой клеток и сигнальными путями, регулируемыми пролиферацию и выживание опухолевых клеток. Исследования показали, что определенные варианты гена TP53, а также активность иммунных сигнальных путей могут быть ассоциированы с клиническим исходом заболевания и метастатическим потенциалом опухоли [28].

В последние годы все большее внимание уделяется роли опухолевого микроокружения в патогенезе остеосаркомы. Опухолевое микроокружение включает фибробласты, эндотелиальные клетки, клетки иммунной системы и компоненты внеклеточного матрикса, которые активно участвуют в регуляции роста опухоли, инвазии и метастазирования. Важную роль в прогрессировании заболевания играет ангиогенез — процесс образования новых кровеносных сосудов, обеспечивающий опухоль кислородом и питательными веществами. Повышенная экспрессия ангиогенных факторов, включая сосудистый эндотелиальный фактор роста (VEGF), способствует формированию сосудистой сети опухоли и повышению ее метастатического потенциала. [32]

Формирование метастазов при остеосаркоме связано также с образованием так называемых метастатических ниш, представляющих собой микросреду в отдаленных органах, благоприятную для выживания и роста опухолевых клеток. В случае остеосаркомы наиболее частым органом метастазирования являются легкие. Взаимодействие опухолевых клеток с клетками иммунной системы, эндотелиальными клетками и компонентами внеклеточного матрикса играет ключевую роль в формировании таких ниш и закреплении циркулирующих опухолевых клеток в тканях-мишенях. [32]

Несмотря на значительную роль генетических нарушений, включая мутации гена TP53, в молекулярном патогенезе остеосаркомы у собак, в настоящее время данные изменения не используются в качестве маркеров прямого выбора стандартной таргетной терапии. Однако они имеют важное значение для биологической стратификации заболевания и разработки новых комбинированных терапевтических подходов, учитывающих генетические и иммунологические особенности опухоли.

Современные направления терапии остеосаркомы у собак включают не только традиционные методы лечения, такие как хирургическое удаление опухоли и системная химиотерапия, но и новые подходы, основанные на достижениях молекулярной и иммунной онкологии. В частности, активно изучаются возможности применения таргетных препаратов, направленных на ингибирование сигнальных путей, участвующих в росте опухоли и ангиогенезе. Перспективным направлением является также развитие методов иммунотерапии, включая использование

иммуномодулирующих препаратов, терапевтических вакцин и подходов, направленных на активацию противоопухолевого иммунного ответа. [33]

Важное место среди экспериментальных методов лечения занимают противоопухолевые вакцины, стимулирующие иммунную систему организма к распознаванию и уничтожению опухолевых клеток. Исследования в этой области показывают, что иммунотерапия может способствовать усилению противоопухолевого иммунного ответа и повышению эффективности традиционных методов лечения.

Следует подчеркнуть, что остеосаркома у собак рассматривается как одна из наиболее информативных моделей остеосаркомы человека в рамках сравнительной онкологии. Сходство клинического течения заболевания, характера метастазирования и молекулярных механизмов опухолевого роста делает данную опухоль важной биологической моделью для изучения патогенеза заболевания и разработки новых терапевтических подходов. Благодаря этим особенностям исследования остеосаркомы у собак играют значительную роль в развитии трансляционной онкологии и могут способствовать созданию новых методов диагностики и лечения как в ветеринарной, так и в человеческой медицине. [32, 34]

9. Молекулярные особенности фибросаркомы кошек

Фибросаркома кошек представляет собой одну из наиболее агрессивных мезенхимальных опухолей мягких тканей у данного вида и характеризуется выраженной локальной инвазивностью, высокой частотой рецидивов и значительной молекулярной гетерогенностью. Особое место занимают формы, ассоциированные с инъекциями, которые рассматриваются как опухоли, возникающие на фоне длительного воспалительного процесса. Современные данные свидетельствуют о том, что фибросаркомы кошек формируют отдельную группу опухолей мягких тканей, характеризующихся сложными молекулярными механизмами канцерогенеза и выраженной биологической агрессивностью [40, 41].

Традиционно патогенез этих опухолей связывали преимущественно с хроническим воспалением в месте введения вакцин или других инъекционных препаратов. Однако современные исследования показывают, что развитие фибросаркомы является результатом сложного взаимодействия воспалительных реакций, генетических нарушений и факторов опухолевого микроокружения. Хроническое воспаление сопровождается высвобождением цитокинов, факторов роста и медиаторов воспаления, которые стимулируют пролиферацию фибробластов, ангиогенез и ремоделирование внеклеточного матрикса, создавая условия для опухолевой трансформации клеток [29, 41].

Одним из ключевых молекулярных нарушений при фибросаркомах кошек являются изменения в

гене TP53, кодирующем белок-супрессор опухолевого роста p53. Дисфункция этого белка приводит к нарушению контроля клеточного цикла, снижению эффективности механизмов репарации ДНК и накоплению генетических повреждений. В результате формируется состояние геномной нестабильности, которое рассматривается как важный фактор инициации и прогрессирования сарком мягких тканей [29, 42]. Нарушения функции p53 могут сопровождаться хромосомными перестройками, изменениями числа копий генов и дисрегуляцией сигнальных путей, контролирующих клеточную пролиферацию и апоптоз.

Важную роль в патогенезе фибросаркомы играет опухолевое микроокружение, формирующееся в условиях хронического воспаления. В опухолевой ткани выявляется инфильтрация макрофагами, лимфоцитами и другими клетками иммунной системы, которые могут оказывать как противоопухолевое, так и проонкогенное действие. В частности, воспалительные клетки способны секретировать медиаторы, активирующие сигнальные пути, связанные с пролиферацией клеток, ангиогенезом и ремоделированием внеклеточного матрикса. Отдельные исследования показывают, что при фибросаркомах кошек отмечается повышенная экспрессия молекул, участвующих в воспалительных сигнальных каскадах, включая компоненты пути NF- κ B и ферменты семейства циклооксигеназ, что дополнительно подтверждает важную роль воспалительных механизмов в развитии данной опухоли [41, 42].

В последние годы значительный прогресс в изучении биологии фибросаркомы связан с использованием методов высокопроизводительного молекулярного анализа. Комплексное применение транскриптомных и протеомных технологий позволило выявить молекулярные сигнатуры, отражающие особенности регуляции клеточного цикла, воспалительных процессов и взаимодействия опухолевых клеток с микроокружением. В исследовании 2025 года, основанном на интеграции данных транскриптомного и протеомного профилирования, было показано, что фибросаркома кошек может рассматриваться как клинически информативная модель агрессивных саркоматозных подтипов [29]. Полученные результаты свидетельствуют о значительной молекулярной гетерогенности данной опухоли и подтверждают участие нескольких сигнальных путей, регулирующих клеточную пролиферацию, миграцию и выживание опухолевых клеток.

В контексте сравнительной онкологии фибросаркомы кошек представляют интерес как модель для изучения механизмов развития агрессивных сарком мягких тканей. Сходство процессов опухолевой инвазии, ангиогенеза и воспалительно-опосредованного канцерогенеза делает данную опухоль информативной системой для исследования общих принципов формирования мезенхимальных новообразований у различных

видов [40, 41]. Кроме того, молекулярное профилирование фибросарком может способствовать выявлению биомаркеров агрессивности и потенциальных терапевтических мишеней.

Таким образом, накопленные данные свидетельствуют о том, что фибросаркома кошек представляет собой молекулярно сложную опухоль, формирование и прогрессирование которой определяется взаимодействием генетических нарушений, включая дисрегуляцию TP53, хронического воспаления и факторов опухолевого микроокружения. Применение современных методов многоуровневого молекулярного анализа позволяет перейти от традиционного патогенетического подхода к более точной молекулярной классификации сарком и создает предпосылки для развития прецизионной ветеринарной онкологии [29, 40–43].

10. Жидкостная биопсия как следующий этап развития персонализированной ветеринарной онкологии

Жидкостная биопсия в последние годы рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений молекулярной диагностики в ветеринарной онкологии. В отличие от традиционного морфологического исследования опухолевой ткани, данный подход основан на анализе опухоли-ассоциированных компонентов, циркулирующих в биологических жидкостях организма, прежде всего в крови. К таким компонентам относятся циркулирующая опухолевая ДНК, фрагменты свободной плазменной ДНК, циркулирующие опухолевые клетки, а также различные молекулы РНК и белковые маркеры. Анализ этих биомаркеров позволяет получать информацию о молекулярных характеристиках опухоли без проведения инвазивных процедур и может отражать суммарный молекулярный профиль опухолевого процесса [44].

Современные обзорные исследования 2024–2025 годов подчеркивают, что жидкостная биопсия в ветеринарной медицине может рассматриваться как многофункциональная диагностическая платформа, предназначенная для раннего выявления опухолевых заболеваний, оценки опухолевой нагрузки, мониторинга эффективности противоопухолевой терапии и выявления минимальной остаточной болезни. Дополнительным преимуществом данного подхода является возможность динамического отслеживания молекулярной эволюции опухоли, включая появление новых генетических изменений, потенциально связанных с развитием лекарственной устойчивости и прогрессированием заболевания [1, 2].

Особое значение для практического внедрения жидкостной биопсии имеют исследования, направленные на стандартизацию аналитических и преаналитических этапов лабораторного анализа. В работе К. Megquier и соавт. показано, что на концентрацию циркулирующей свободной ДНК у собак существенное влияние оказывают различные

преаналитические факторы, включая условия и время забора крови, особенности обработки образцов, тип опухоли и текущее клиническое состояние животного [30]. Эти данные указывают на необходимость строгой стандартизации протоколов забора и обработки биологического материала, поскольку вариабельность преаналитического этапа может существенно влиять на результаты молекулярного анализа.

Таким образом, дальнейшее развитие жидкостной биопсии в ветеринарной онкологии связано не только с расширением спектра молекулярных биомаркеров, но и с совершенствованием методологических подходов к их выявлению и интерпретации. Интеграция данных жидкостной биопсии с результатами геномного профилирования опухолевой ткани и клиническими характеристиками заболевания открывает новые возможности для более точной стратификации пациентов и реализации принципов прецизионной ветеринарной онкологии [1, 2, 30].

Выводы/Conclusions

Представленный обзор систематизирует современные данные о клинически значимых молекулярных мутациях и сигнальных путях опухолей у собак и кошек, а также оценивает их диагностическое, прогностическое и терапевтическое значение. Накопленные за последние годы результаты молекулярных исследований свидетельствуют о том, что ветеринарная онкология постепенно переходит от преимущественно морфологического подхода к интеграции генетических, транскриптомных и иммунобиологических маркеров в клиническое принятие решений.

На сегодняшний день наиболее клинически валидированными молекулярными маркерами остаются мутации KIT при мастоцитоме собак и BRAF V595E при уротелиальной и простатической карциноме собак, для которых показана практическая применимость молекулярного тестирования в диагностике и выборе терапии. Одновременно активно расширяется спектр потенциальных молекулярных мишеней, включающих нарушения сигнальных путей HER2, PIK3CA, EGFR, а также молекулы иммунных контрольных точек. Несмотря на значительный объем экспериментальных и ранних клинических данных, широкое внедрение этих маркеров в рутинную ветеринарную практику требует дальнейшей стандартизации диагностических методов, расширения клинических когорт и проведения проспективных исследований.

Современные геномные и транскриптомные исследования также демонстрируют выраженную молекулярную гетерогенность опухолей у собак

и кошек, что подчеркивает необходимость комплексного молекулярного профилирования. Интеграция данных морфологического исследования, молекулярной диагностики и анализа опухолевого микроокружения позволяет более полно характеризовать биологию опухоли и повышает возможности стратификации пациентов по прогнозу и потенциальному ответу на терапию.

Важную роль в развитии данного направления играет сравнительная онкология. Ряд опухолей у собак, включая оральную меланому и остеосаркому, демонстрирует значительное сходство с соответствующими опухолями человека по клиническому течению, молекулярным механизмам канцерогенеза и особенностям метастазирования. Это делает данные заболевания ценными биологическими моделями для изучения патогенеза опухолей и разработки новых терапевтических подходов.

В ближайшие годы ключевым направлением развития ветеринарной онкологии, вероятно, станет интеграция традиционных морфологических методов с современными технологиями молекулярного анализа. Применение высокопроизводительного секвенирования и развитие жидкостной биопсии создают возможности для более точной молекулярной диагностики, динамического мониторинга опухолевого процесса и раннего выявления молекулярных изменений, связанных с прогрессированием заболевания или формированием лекарственной устойчивости. Реализация этих подходов формирует основу для дальнейшего развития прецизионной ветеринарной онкологии и внедрения более индивидуализированных стратегий диагностики и лечения опухолей у собак и кошек [1–3, 30].

Несмотря на быстрый прогресс в области молекулярной ветеринарной онкологии, следует учитывать, что для большинства описанных молекулярных маркеров доказательная база пока ограничена относительно небольшими клиническими когортами и преимущественно ретроспективными исследованиями. В этой связи дальнейшее развитие данного направления требует проведения многоцентровых клинических исследований, направленных на стандартизацию молекулярной диагностики и подтверждение клинической эффективности таргетных и иммунных терапевтических подходов. Одновременно интеграция геномных, транскриптомных, протеомных и иммунологических данных в рамках многоомного профилирования опухолей открывает новые возможности для более глубокого понимания биологии опухолей и формирования персонализированных стратегий лечения.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Aupperle-Lellbach H., Kehl A., de Brot S., van der Weyden L. Clinical Use of Molecular Biomarkers in Canine and Feline Oncology: Current and Future. *Veterinary Sciences*. 2024; 11(5): 199. <https://doi.org/10.3390/vetsci11050199>
2. Alshammari A.H. *et al.* Advancing Veterinary Oncology: Next-Generation Diagnostics for Early Cancer Detection and Clinical Implementation. *Animals*. 2025; 15(3): 389. <https://doi.org/10.3390/ani15030389>
3. De Biase D. *et al.* Investigation of the Theragnostic Role of KIT Expression for the Treatment of Canine Mast Cell Tumors with Tyrosine Kinase Inhibitors. *Veterinary Sciences*. 2024; 11(10): 492. <https://doi.org/10.3390/vetsci11100492>
4. Montanucci L. *et al.* Mutational Landscape of *KIT* Proto-Oncogene Coding Sequence in 62 Canine Cutaneous and Subcutaneous Mast Cell Tumors. *Veterinary Sciences*. 2024; 11(12): 593. <https://doi.org/10.3390/vetsci11120593>
5. Puget C. *et al.* Artificial intelligence predicts c-KIT exon 11 genotype by phenotype in canine cutaneous mast cell tumors: Can human observers learn it?. *Veterinary Pathology*. 2026; 63(2): 369–379. <https://doi.org/10.1177/03009858251380284>
6. de Moura F.B.C., Amorim R.L., Fonseca-Alves C.E. Tyrosine kinase inhibitors in canine solid tumours: a systematic review of indications, response and safety. *Veterinary Oncology*. 2025; 2: 21. <https://doi.org/10.1186/s44356-025-00036-1>
7. Mochizuki H., Shapiro S.G., Breen M. Detection of BRAF Mutation in Urine DNA as a Molecular Diagnostic for Canine Urothelial and Prostatic Carcinoma. *PLOS One*. 2015; 10(12): e0144170. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144170>
8. Aeschlimann L. *et al.* Effective detection of *BRAF^{V600E}* mutation in canine urothelial and prostate carcinomas using immunohistochemistry. *Veterinary and Comparative Oncology*. 2024; 22(2): 295–302. <https://doi.org/10.1111/vco.12978>
9. Appenzeller M., Kehl A., Törner K., Jensen K.C., Klopffleisch R., Aupperle-Lellbach H. BRAF Mutation Analysis: A Retrospective Evaluation of 8365 Diagnostic Samples with a Special View on Canine Breeds (2018–2024). *Veterinary Sciences*. 2025; 12(8): 729. <https://doi.org/10.3390/vetsci12080729>
10. Kehl A., Aupperle-Lellbach H., Brockmann M., van de Weyer A.-L., Appenzeller M., Steiger K. Utility of Urinary miRNA Biomarkers for Canine Urothelial Carcinoma Diagnostics. *Veterinary Sciences*. 2025; 12(7): 621. <https://doi.org/10.3390/vetsci12070621>
11. Lorch G. *et al.* Identification of Recurrent Activating *HER2* Mutations in Primary Canine Pulmonary Adenocarcinoma. *Clinical Cancer Research*. 2019; 25(19): 5866–5877. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-19-1145>
12. Brunetti B. *et al.* Protein Expression, Amplification, and Mutation of *HER2* Gene in Canine Primary Pulmonary Adenocarcinomas: Preliminary Results. *Animals*. 2024; 14(18): 2625. <https://doi.org/10.3390/ani14182625>
13. Marcinowska A., Horta R.D.S., Queiroga F., Giuliano A. Canine lung carcinoma—A descriptive review. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025; 11: 1464659. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1464659>
14. Vazquez E., Lipovka Y., Cervantes-Arias A., Garibay-Escobar A., Haby M.M., Queiroga F.L., Velazquez C. Canine Mammary Cancer: State of the Art and Future Perspectives. *Animals*. 2023; 13(19): 3147. <https://doi.org/10.3390/ani13193147>
15. Arendt M.L. *et al.* *PIK3CA* is recurrently mutated in canine mammary tumors, similarly to in human mammary neoplasia. *Scientific Reports*. 2023; 13: 632. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27664-7>
16. Seung B.-J., Sur J.-H. Detection of *PIK3CA* hotspot mutations in canine mammary tumors using droplet digital PCR: tissue validation and liquid biopsy feasibility. *Scientific Reports*. 2024; 14: 25587. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76820-0>
17. Yeom J., Cho Y., Ahn S., Jeung S. Anticancer effects of alpelisib on *PIK3CA*-mutated canine mammary tumor cell lines. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1279535. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1279535>
18. Mei C. *et al.* Dysregulated Signaling Pathways in Canine Mammary Tumor and Human Triple Negative Breast Cancer: Advances and Potential Therapeutic Targets. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(1): 145. <https://doi.org/10.3390/ijms26010145>
19. Rodrigues-Jesus J., Vilhena H., Canadas-Sousa A., Dias-Pereira P. Feline Mammary Tumors: A Comprehensive Review of Histological Classification Schemes, Grading Systems, and Prognostic Factors. *Veterinary Sciences*. 2025; 12(8): 736. <https://doi.org/10.3390/vetsci12080736>
20. Franco M. *et al.* PD-1, PD-L1, and PD-L2 Expression as Predictive Markers in Rare Feline Mammary Tumors. *Veterinary Sciences*. 2025; 12(8): 731. <https://doi.org/10.3390/vetsci12080731>
21. Tutu P. *et al.* Feline oral squamous cell carcinoma: recent advances and future perspectives. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025; 12: 1663990. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1663990>
22. Altamura G., Borzacchiello G. Anti-EGFR monoclonal antibody Cetuximab displays potential anti-cancer activities in feline oral squamous cell carcinoma cell lines. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 1040552. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1040552>
23. Rodney A.R. *et al.* Genomic landscape and gene expression profiles of feline oral squamous cell carcinoma. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1079019. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1079019>
24. Vanhaezebrouck I.F., Bakhle K.M., Mendez-Valenzuela C.R., Lyle L.T., Konradt K., Scarpelli M.L. Single institution study of the immune landscape for canine oral melanoma based on transcriptome analysis of the primary tumor. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1285909. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1285909>
25. Mucignat G. *et al.* A Whole-Transcriptomic Analysis of Canine Oral Melanoma: A Chance to Disclose the Radiotherapy Effect and Outcome-Associated Gene Signature. *Genes*. 2024; 15(8): 1065. <https://doi.org/10.3390/genes15081065>
26. Dagli M.L.Z. *et al.* Identification of mutations in canine oral mucosal melanomas by exome sequencing and comparison with human melanomas. *Scientific Reports*. 2024; 14: 24174. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74748-z>
27. Mannheimer J.D. *et al.* Transcriptional profiling of canine osteosarcoma identifies prognostic gene expression signatures with translational value for humans. *Communications Biology*. 2023; 6: 856. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05208-z>
28. Das S. *et al.* Immune pathways and *TP53* missense mutations are associated with longer survival in canine osteosarcoma. *Communications Biology*. 2021; 4: 1178. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02683-0>
29. Weber M. *et al.* Transcriptomic and proteomic profiling identifies feline fibrosarcoma as clinically amenable model for aggressive sarcoma subtypes. *Neoplasia*. 2025; 60: 101104. <https://doi.org/10.1016/j.neo.2024.101104>
30. Megquier K. *et al.* Impact of preanalytical factors on liquid biopsy in the canine cancer model. *bioRxiv*. 2024; 605605. <https://doi.org/10.1101/2024.07.29.605605>
31. Chu K.T., Nekouei O., Giuliano A. Treatment outcomes of dogs with transitional cell carcinoma. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025; 12: 1486786. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1486786>
32. Dolnicka A., Fosse V., Raciborska A., Śmieszek A. Building a Therapeutic Bridge Between Dogs and Humans: A Review of Potential Cross-Species Osteosarcoma Biomarkers. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(11): 5152. <https://doi.org/10.3390/ijms26115152>
33. Fenger JM, London CA, Kisseberth WC. Canine osteosarcoma: a naturally occurring disease to inform pediatric oncology. *ILAR J*. 2014; 55(1): 69–85. <https://doi.org/10.1093/ilar/ihu009>
34. Arendt M.L., van der Heiden A.D., Pensch R., Lindblad-Toh K. Genetics of canine cancer: a guide for the veterinary oncologist. *Veterinary Oncology*. 2025; 2: 9. <https://doi.org/10.1186/s44356-025-00021-8>
35. McDonald C., Taylor D., Linacre A. PCR in Forensic Science: A Critical Review. *Genes*. 2024; 15(4): 438. <https://doi.org/10.3390/genes15040438>
36. Isaac A. *et al.* Next-Generation Sequencing: A Review of Its Transformative Impact on Cancer Diagnosis, Treatment, and Resistance Management. *Diagnostics*. 2025; 15(19): 2425. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15192425>
37. Ramos-Vara J.A., Miller M.A. When tissue antigens and antibodies get along: revisiting the technical aspects of immunohistochemistry—the red, brown, and blue technique. *Veterinary Pathology*. 2014; 51(1): 42–87. <https://doi.org/10.1177/0300985813505879>
38. Provenzano G. *et al.* Altered Expression of GABAergic Markers in the Forebrain of Young and Adult *Engrailed-2* Knockout Mice. *Genes*. 2020; 11(4): 384. <https://doi.org/10.3390/genes11040384>

39. Smail C., Montgomery S.B. RNA Sequencing in Disease Diagnosis. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*. 2024; 25: 353–367. <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-021623-121812>

40. Ludwig L., Dobromylskij M., Wood G.A., van der Weyden L. Feline Oncogenomics: What Do We Know about the Genetics of Cancer in Domestic Cats?. *Veterinary Sciences*. 2022; 9(10): 547. <https://doi.org/10.3390/vetsci9100547>

41. Hartmann K *et al.* Feline Injection-Site Sarcoma and Other Adverse Reactions to Vaccination in Cats. *Viruses*. 2023; 15(8): 1708. <https://doi.org/10.3390/v15081708>

42. Lin J., Kouznetsova V.L., Tsigelny I.F. Molecular Mechanisms of Feline Cancers. *OBM Genetics*. 2021; 5(2). <https://doi.org/10.21926/obm.genet.2102131>

43. Wojtkowska A *et al.* Comparison of MMP-2, MMP-9, COX-2, and PGP Expression in Feline Injection-Site and Feline Noninjection-Site Sarcomas-Pilot Study. *Animals (Basel)*. 2024 Jul 19;14(14):2110. <https://doi.org/10.3390/ani14142110>

44. Wan J. *et al.* Liquid biopsies come of age: towards implementation of circulating tumour DNA. *Nature Reviews Cancer*. 2017; 17(4): 223–238. <https://doi.org/10.1038/nrc.2017.7>

ОБ АВТОРАХ

Юлия Николаевна Меликова¹

кандидат ветеринарных наук, исполнительный директор ветеринарной клиники
melikova.u@newvettech.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9322-1464>.

Борис Викторович Виолин²

кандидат ветеринарных наук
b_viol@yahoo.com

¹ООО «Новые ветеринарные технологии» (сокр. ООО «НьюВетТех»), ул. Большая Серпуховская, 62, к2, Москва, 115093, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии — филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.П. Коваленко Российской академии наук», Звенигородское шоссе, 5, Москва, 123022, Россия

ABOUT THE AUTHORS:

Julia Nikolaevna Melikova¹

Candidate of Veterinary Sciences, Executive Director of a Veterinary Clinic
melikova.u@newvettech.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9322-1464>.

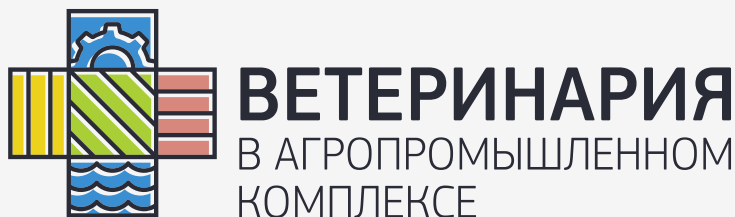
Boris Viktorovich Violin²

Candidate of veterinary sciences
b_viol@yahoo.com

¹ LLC “New Veterinary Technologies”

(LLC “NewVetTech”), 62/2 Bolshaya Serpukhovskaya st., Moscow, 115093, Russia

²All-Russian Research Institute of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology — a branch of the of the Federal Scientific Centre VIEV, 5 Zvenigorodskoe shosse, Moscow, 123022, Russia



XV Международная
научно-практическая конференция

ВЕТЕРИНАРИЯ В АПК
2-4 ИЮНЯ 2026

СОЗДАЁМ КОМФОРТНОЕ ПРОСТРАНСТВО
ДЛЯ ЖИВОГО ОБЩЕНИЯ И РЕШЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ЗАДАЧ АПК

 **НОВОСИБИРСК**
ЭКСПО ЦЕНТР
НОВОСИБИРСК, УЛ. СТАНЦИОННАЯ, 104

ОТСКАНИРУЙТЕ
И УЗНАЙТЕ
ПОДРОБНОСТИ



Реклама

Т.Н. Шнякина

П.Н. Щербаков

К.В. Степанова ✉

Южно-Уральский государственный
аграрный университет, Троицк,
Россия

✉ deratizator@bk.ru

Поступила в редакцию: 01.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 28.03.2026

© Шнякина Т.Н., Щербаков П.Н.,
Степанова К.В.

Экспериментальное исследование применения сетчатых имплантатов при промежностных грыжах у лабораторных животных

РЕЗЮМЕ

Проблема выбора оптимального сетчатого имплантата для герниопластики остается актуальной в связи с риском послеоперационных осложнений, в частности сморщивания трансплантата. В статье представлены исследования по сравнительному изучению тканевой реакции, воспалительного ответа и степени сморщивания после имплантации полипропиленовой сетки «ЭСФИЛ» и титановой сетки «Титановый шелк» при смоделированных грыжах у лабораторных крыс. Эксперимент проведен на 30 нелинейных крысах-самцах с моделью промежностной грыжи. Животные разделены на три группы: контрольная (n = 6, ушивание грыжи), 1-я опытная (n = 12, имплантация сетки «Титановый шелк») и 2-я опытная (n = 12, имплантация сетки «ЭСФИЛ»). Оценку сморщивания проводили путем измерения площади имплантатов на 30-е и 90-е сутки и по гематологическим показателям. Степень сморщивания сетки «Титановый шелк» составила $5,5 \pm 0,8\%$, что статистически значимо ниже ($p < 0,01$), чем у сетки «ЭСФИЛ» ($22,1 \pm 2,3\%$). На 14-е сутки у животных с полипропиленовой сеткой сохранялись более высокие показатели лейкоцитов и их субпопуляций, указывающие на продолжение воспалительного процесса. Имплантат «Титановый шелк» продемонстрировал лучшую биосовместимость, минимальную контракцию и более быстрое восстановление лабораторных животных, что позволяет рекомендовать его для применения в ветеринарной практике при лечении промежностных грыж.

Ключевые слова: лабораторные животные, промежностные грыжи, имплантат, заживление, терапевтическая эффективность

Для цитирования: Шнякина Т.Н., Щербаков П.Н., Степанова К.В. Экспериментальное исследование применения сетчатых имплантатов при промежностных грыжах у лабораторных животных. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 20–28. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-20-28>

Tatyana N. Shnyakina

Pavel N. Shcherbakov

Ksenia V. Stepanova ✉

South Ural State Agrarian University,
Troitsk, Russia

✉ deratizator@bk.ru

Received by the editorial office: 01.12.2025

Accepted in revised: 15.03.2026

Accepted for publication: 28.03.2026

© Shnyakina T.N., Shcherbakov P.N.,
Stepanova K.V.

Experimental study of the use of mesh implants in perineal hernias in laboratory animals

ABSTRACT

The problem of choosing the optimal mesh implant for hernioplasty remains relevant due to the risk of postoperative complications, in particular, wrinkling of the graft. The article presents studies on the comparative study of tissue reaction, inflammatory response and degree of wrinkling after implantation of polypropylene mesh «ESFIL» and titanium mesh «Titanovy Shelk» in simulated hernias in laboratory rats. The experiment was conducted on 30 non-linear male rats with a model of perineal hernia. The animals are divided into three groups: control (n = 6, suturing hernia), 1st experimental (n = 12, implantation of «Titanovy Shelk» mesh) and 2nd experimental (n = 12, implantation of «ESFIL» mesh). Wrinkling was assessed by measuring the area of implants on the 30th and 90th day and by hematological indicators. The degree of wrinkling of the mesh «Titanovy Shelk» is $5.5 \pm 0.8\%$, which is statistically significantly lower ($p < 0.01$) than that of the mesh «ESFIL» ($22.1 \pm 2.3\%$). On the 14th day, animals with a polypropylene mesh had higher levels of leukocytes and their subpopulations, indicating the continuation of the inflammatory process. Implant «Titanium Silk» demonstrated better biocompatibility, minimal contraction and faster recovery of laboratory animals, which allows recommending it for use in veterinary practice in the treatment of perineal hernias.

Key words: laboratory animals, perineal hernias, implant, healing, therapeutic efficacy

For citation: Shnyakina T.N., Shcherbakov P.N., Stepanova K.V. Experimental study of the use of mesh implants in perineal hernias in laboratory animals. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 20–28 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-20-28>

Введение/Introduction

Промежностная грыжа определяется как выпячивание внутрибрюшных органов через дефект в тазовом дне в промежностное пространство [1, 2]. Приобретенная промежностная грыжа является редким, но документированным осложнением обширных операций на органах таза, особенно абдоминоперинеальной резекции при раке прямой кишки и тазовой экзентерации. Сообщаемая частота составляет менее 1% в симптоматических случаях и приблизительно 7% в бессимптомных случаях.

В последние годы наблюдается увеличение частоты, вероятно, из-за более широкого использования неоадьювантной химиолучевой терапии [1, 3, 4]. Промежностная грыжа, как правило, развивается в первые два года после хирургического вмешательства, в среднем — через 10 месяцев. Основными ее проявлениями служат болезненное выпячивание и чувство дискомфорта, нарастающее в положении стоя или сидя. Среди возможных осложнений выделяют эрозию кожи в области грыжи, дизурические расстройства и симптомы кишечной непроходимости [1, 4–7].

Грыжесечение является одной из наиболее распространенных операций в абдоминальной хирургии, составляя 10–21% от общего числа операций. Применение многочисленных аутопластических методов лечения промежностных грыж [6, 8–10], а их известно более 1000, во многих случаях выявило один общий существенный недостаток: использование тканей с морфо-функциональной недостаточностью, сшиваемых при определенных условиях с выраженным натяжением, приводит к несостоятельности пластики [11–13].

В последнее время для протезирования грыжевых ворот применяют различные синтетические материалы нового поколения. Наряду с такими важными свойствами как прочность, биосовместимость, инертность, отсутствие вредного воздействия на организм пациента, новые материалы могут также противостоять инфекции и не отторгаются даже в условиях гнойной раны. Эти свойства современных протезных материалов расширяют показания к применению аллопластики. В научной литературе встречаются сообщения о результатах хирургического лечения промежностных грыж с применением имплантов из титанизированного полипропилена [14–17]. Сообщения об отдаленных результатах применения имплантов из титановой нити отсутствуют.

Данных о сравнительном морфологическом анализе тканевой реакции на имплантацию таких пластических материалов, как полипропиленовая и титановая сетки, а также их применении в аллопластике в современной литературе мало. Ввиду актуальности проблемы [17–20] и ее малой проработанности, было принято решение провести углубленные исследования в этом направлении.

Целью исследований стало сравнительное изучение тканевой реакции, воспалительного ответа

и степени сморщивания после имплантации полипропиленовой сетки «ЭСФИЛ» и титановой сетки «Титановый шелк» при смоделированных грыжах у лабораторных крыс.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент выполняли в два этапа в период с 2022 по 2024 г. на базе вивария и кафедры Инфекционных болезней и ветеринарно-санитарной экспертизы Института ветеринарной медицины ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (Троицк, Россия).

На первом этапе был проведен отбор животных для эксперимента, подбор методик и подготовка животных для его проведения (животных помещали в равные условия кормления, содержания и мотции). На втором этапе проводили изучение тканевой реакции, воспалительного ответа и степени сморщивания после имплантации полипропиленовой сетки «ЭСФИЛ» и титановой сетки «Титановый шелк» при смоделированных грыжах у лабораторных крыс. На третьем этапе проводили контрольные физиологические и гематологические исследования.

Материалом исследования являлся «Титановый шелк», представляющий собой сетчатую конструкцию, изготовленную из титановой нити толщиной от 10 до 30 микрон высокой степени очистки, и сетка хирургическая Линтекс «Эсфил», изготовленная из переплетенных нерассасывающихся волокон изотактического кристаллического стереоизомера полипропилена — синтетического линейного полиолефина (СЗН6)п. Для определения тканевой реакции на подкожную имплантацию сетчатых материалов и степень сморщивания имплантов было проведено экспериментальное исследование на лабораторных животных (30 крыс белых лабораторных нелинейных (аутбредных), мужского пола, крысы родители — 2 самца на 4 самки, приобретались у индивидуального предпринимателя, имеющего лицензию на право ведения ветеринарной деятельности и реализацию лабораторных животных, соответствие ГОСТ 33215-2014, с ветеринарными свидетельствами, животные были специфически свободны от патогенов, от них получили потомство методом последовательных пометов, которое и участвовало в экспериментах).

Изучалась тканевая реакция на подкожную имплантацию различных сетчатых материалов. Зона имплантации у лабораторных животных располагалась в брюшной области (промежность). Самым глубоким слоем, отделяющим кожу крысы от подлежащих тканей, являлась подкожная основа — *tela subcutanea*. Этот слой представлен рыхлой волокнистой соединительной тканью с коллагеновыми и эластическими волокнами и включениями жировой ткани. Выше она сливается с дермой, ниже рыхло прикрепляется к глубже расположенным фасциям (поверхностной фасции). Выбор

данного слоя для имплантации обусловлен необходимостью стандартизировать условия для изучения тканевой реакции (формирования фиброзной капсулы) вокруг чужеродного материала в условиях, приближенных к подкожной фиксации сетки при герниопластике.

Животные были распределены на три группы — 1 контрольная группа (6 животных) и 2 опытные группы (по 12 животных).

Контрольная группа (ветеринарный контроль) животных служила для сравнительной оценки поведенческих реакций и общего состояния, в этой группе имплантация не выполнялась, смоделированная промежностная грыжа ушивалась по общепринятой методике.

Лабораторным животным первой опытной группы имплантировался сетчатый имплантат на основе титана — сетка титановая для армирующей пластики мягких тканей «Титановый шелк» производителя Ti-Light, которая фиксировалась с помощью титанового шовного материала Титанелл² представленного мононитью размером 4/0.

Лабораторным животным второй опытной группы выполнялась имплантация полипропиленовой сеткой «ЭСФИЛ» производителя ООО «Линтекс», состоящей из мононити диаметром 0,09 мм.

Для оценки воспалительного процесса в организме испытуемых был исследован морфологический состав крови до и после операции. Отбор крови производили из краниальной полой вены. Животное под газовым наркозом укладывалось в положении лежа на спине, грудные конечности вытягивались вдоль туловища. Иглу вводили в грудную полость, в пространство между рукояткой грудины и первым ребром под углом 20–30° по направлению к противоположной головке бедра. Затем аккуратно оттягивали поршень шприца и медленно продвигали иглу в обратном направлении до появления крови в шприце. После отбора образца крови извлекали шприц с иглой и оказывали мануальное давление на место вкола в течение 20–30 сек. для предупреждения интра-торакального кровотечения.

Операцию проводили под общим обезболиванием, сочетая нейролептики и инфильтрационную анестезию 0,25–0,5% раствором новокаина по линии разреза.

Животным вводился двухкомпонентный наркоз — внутримышечные инъекции ксилази-на 20 мг/кг, по истечению 20–30 мин золетил 0,5 мг/кг. Предоперационная подготовка животных заключалась в 3-х часовой голодной диете, без ограничения потребления воды.

Подготовка операционного поля осуществлялась по общепринятой методике: брюшную полость выбривали с помощью бритвы. Поверхность кожи обрабатывалась 5%-ным йодным спиртовым

раствором. Операционное поле изолировали стерильным полотном, которое закрепляли при помощи цапок.

С помощью скальпеля делали разрез длиной 2–3 см в области сформированной грыжи, тупым способом отделяли подкожную клетчатку от прямой мышцы живота. Сетки размером 1 на 1,5–2 см фиксировали с умеренным натяжением с помощью узловых швов (3 на стороне 1 см и 4 на стороне 2 см). Послеоперационная рана ушивалась послойно.

Для оценки степени сморщивания сетчатых имплантов определяли их площадь при ультразвуковом и физикальном исследовании на 3-и и 9-е сутки после операции.

Площадь импланта рассчитывали следующим образом: среднюю длину импланта умножали на среднюю его высоту. Среднюю длину импланта рассчитывали, как среднее арифметическое между максимальной и минимальной длиной импланта.

Среднюю высоту импланта определяли, как среднее арифметическое между тремя измерениями его высоты перпендикулярно его оси по длине — два отрезка в крайних точках и один посередине. Степень сморщивания сетчатых имплантов рассчитывали, как уменьшение площади импланта через 90 суток после операции к площади импланта через 30 суток после вмешательства, выраженное в процентном отношении.

В качестве статистического метода обработки результатов полученных данных, то есть оценки статистической значимости различий между группами лабораторных животных, участвующих в эксперименте, применяли U-тест Манна-Уитни.

Эксперименты проведены с соблюдением требований, изложенных в Директиве Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22 сентября 2010 года о защите животных, используемых для научных целей (Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22 сентября 2010 года по охране животных, используемых в научных целях¹ и принципам обращения с животными, согласно статье 4 ФЗ РФ N 498-ФЗ (Федеральный закон от 27.12.2018 N 498-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»)².

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Клиническая картина послеоперационного периода у крыс опытных групп не имела значимых отличий. Животные вышли из наркоза в среднем за 60 ± 2 минут после операции.

¹ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях (URL: https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063_rus.pdf)

² Федеральный закон от 27.12.2018 N 498-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

В ходе наблюдений отмечались типичные для данного вида животных поведенческие реакции: крысы активно передвигались по клетке, принимали пищу.

Суточный остаток корма и воды у животных в группах не имел значимых различий.

Прирост массы тела, как интегральный показатель общего состояния животного, отражен в таблице 1.

Представленные данные свидетельствуют о том, что в течение 1-ой недели имела место реакция на инвазивную процедуру в виде статистически значимой разницы в наборе массы тела между животными контрольной и всех опытных групп.

Между опытными группами статистически значимых различий не наблюдалось. К 14-м суткам отмечены статистически достоверные различия по массе тела в 1-ой («Титановый шелк») и 2-ой («ЭСФИЛ») опытных группах, что может быть связано с сохраняющейся реакцией организма на имплантацию. К 30-м суткам отставание в наборе массы тела сохранялась во 2-ой опытной группе животных («ЭСФИЛ»).

На 60-е сутки наблюдения достоверных различий в массе тела по группам не отмечено, что свидетельствовало о завершении основополагающих энергозависимых биологических реакций организма на имплантацию сетчатых материалов в данном эксперименте. При проведении тщательного клинического обследования лабораторных животных было отмечено, что в области послеоперационной раны послеоперационный отек во всех группах животных наблюдался первые 2-е суток.

В дальнейшем раны заживали первичным натяжением, случаев нагноения не было. Выраженной болезненной реакции экспериментальных животных при пальпации области установки имплантатов не отмечалось. На основании результатов, полученных при изучении макропрепаратов на разных сроках экспериментального исследования, можно отметить, что тканевая реакция на имплантацию изучаемых образцов

характеризовалась общей картиной затухающего асептического воспаления, как типовой патологической реакции на травму.

В результате, вокруг элементов титановой сетки для армирующей пластики мягких тканей «Титановый шелк» сформировалась более тонкая соединительнотканная капсула, фиксированная к прилежащим структурам (дерме и поверхностной фасции), это более «нежно» отразилось на иммунной реакции организма лабораторных животных, что являлось одним из значительных положительных моментов применения данного имплантата.

Анализ полученных данных выявил разнонаправленные тенденции в изменении геометрических размеров имплантатов в зависимости от материала сетки (табл. 2).

У животных, которым имплантировали полипропиленовую сетку «ЭСФИЛ», наблюдалась выраженная тенденция к сморщиванию имплантата. На 30-е сутки средняя площадь сетки составляла $2,63 \pm 0,18 \text{ см}^2$. К 90-м суткам эксперимента площадь имплантата достоверно уменьшилась до $2,05 \pm 0,21 \text{ см}^2$ ($p < 0,05$). Степень сморщивания в данной группе достигла $22,1 \pm 2,3\%$. При физикальном осмотре и УЗ-исследовании на поздних сроках отмечалась умеренная деформация краев сетки, что предположительно связано с активной воспалительной реакцией и последующим фиброобразованием, характерным для полипропилена.

В группе животных с имплантацией титановой сетки «Титановый шелк» зафиксирована значительно меньшая степень контракции. Площадь имплантата на 30-е сутки составила в среднем $2,91 \pm 0,12 \text{ см}^2$. К 90-м суткам наблюдения площадь уменьшилась незначительно — до $2,75 \pm 0,15 \text{ см}^2$, что составило всего $5,5 \pm 0,8\%$ от исходного размера. Визуально и при пальпации имплантаты сохраняли свою первоначальную форму и эластичность, плотно прилегая к окружающим тканям без признаков грубой деформации.

Сравнительный анализ с использованием U-критерия Манна-Уитни выявил высоко достоверные различия между опытными группами. Степень сморщивания имплантата «Титановый шелк» была статистически значимо ниже ($p < 0,01$), чем у полипропиленовой сетки «ЭСФИЛ» ($5,5\%$ против $22,1\%$). Это свидетельствует о большей стабильности размеров и формоустойчивости титановой сетки в отдаленном послеоперационном периоде.

Таблица 1. Прирост массы тела экспериментальных животных

Table 1. Body weight gain of experimental animals

Группа	Сроки наблюдения, масса (г)				
	Исходно	7 суток	14 суток	30 суток	60 суток
Контрольная	293 ± 32	312 ± 28	344 ± 29	361 ± 23	380 ± 32
1-я группа («Титановый шелк»)	287 ± 36	295 ± 30*	336 ± 38	347 ± 39	375 ± 28
2-я группа («ЭСФИЛ»)	290 ± 40	303 ± 35*	312 ± 40*	324 ± 26*	367 ± 35

Примечание: * — статистически значимое различие ($p \leq 0,05$) с группой контроля в тот же период наблюдения

Таблица 2. Динамика площади сетчатых имплантатов ($M \pm m$)

Table 2. Dynamics of mesh implant area ($M \pm m$)

Группа	Материал имплантата	Площадь на 30-е сутки (см^2)	Площадь на 90-е сутки (см^2)	Сморщивание (%)
1-я опытная (n = 12)	«Титановый шелк»	$2,91 \pm 0,12$	$2,75 \pm 0,15^*$	$5,5 \pm 0,8\%$
2-я опытная (n = 12)	«ЭСФИЛ»	$2,63 \pm 0,18$	$2,05 \pm 0,21^{**}$	$22,1 \pm 2,3\%^{**}$

Примечание: * — различия достоверны относительно показателя на 30-е сутки ($p < 0,05$)

Имплантаты «ЭСФИЛ» вызвали выраженную сосудистую реакцию, в том числе за счет неоангиогенеза. Вокруг этих имплантатов сформировалась плотная соединительнотканная капсула.

В опытной группе животных, которым применяли оперативный доступ с полипропиленовым сетчатым имплантатом «ЭСФИЛ» процесс рубцевания при клиническом исследовании в послеоперационном периоде оказался более выраженным, но при этом, надежная фиксация имплантата к коже и поверхностной фасции отмечалась в группе именно с сетчатым имплантатом «Титановый шелк», что являлось залогом того, что данный имплант не мигрирует с раневого поля на окружающие ткани, соответственно он даст более эффективный результат именно в послеоперационном периоде заживления.

Результаты морфологического исследования крови лабораторных животных до операции представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, представленные результаты исходной гематологической картины у экспериментальных животных указывали на наличие умеренного лейкоцитоза в первой и второй группах, что не являлось грубым нарушением в системе кроветворения, однако указывало на некие компенсаторные механизмы, развивающиеся в организме у всех лабораторных животных.

Проведенный сравнительный анализ с референсным интервалом показал, что уровень лейкоцитов у крыс первой группы был выше верхней границы нормы на 3,4%, во второй группе это превышение достигало 5,9%.

Полученные данные позволяют предположить, что до начала эксперимента животные могли находиться под воздействием факторов, вызывающих активацию иммунной системы, таких как адаптационный стресс, что вполне характерно для лабораторных животных, находящихся в эксперименте, так как физиологические процессы компенсируются за счет гормонального фона,

Рис. 1. Морфологический состав крови лабораторных животных до операции
Fig. 1. Morphological composition of the blood of laboratory animals before surgery

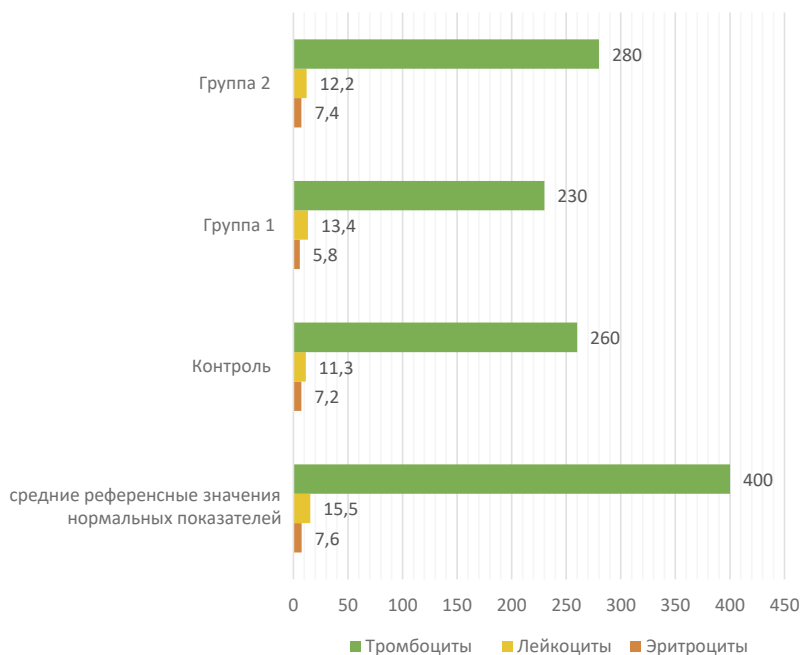
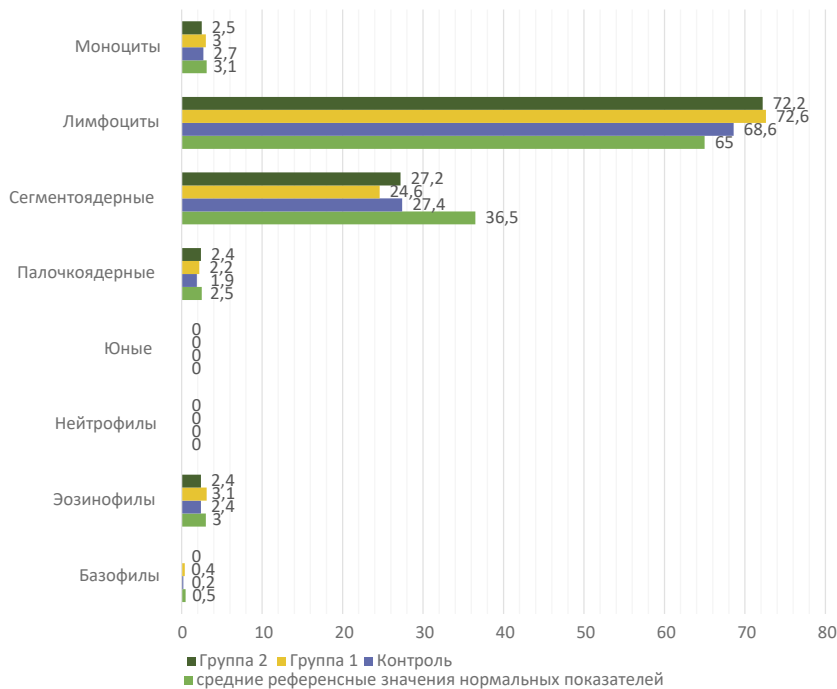


Рис. 2. Лейкоцитарный профиль крови лабораторных животных до операции
Fig. 2. Leukocyte profile of the blood of laboratory animals before surgery



так и внешних воздействий на нейро-гуморальную систему. Учет данного исходного отклонения является важным для последующей корректной интерпретации влияния экспериментальных факторов в ходе исследования на организм лабораторных животных. Данные изменения лейкоцитарного профиля лабораторных животных до проведения операции по применению различных имплантатов представлены на рисунке 2.

Анализ гематологических данных выявил комплекс изменений, характерных для развернутого системного воспалительного ответа.

Наблюдаемые лейкоцитоз, нейтрофилия с гиперсегментацией ядер нейтрофилов (сдвиг вправо) и значительное повышение скорости оседания эритроцитов представляли собой классический гематологический синдром, регистрируемый при хроническом воспалении. В рамках предложенной экспериментальной модели данная картина является специфичной и этиологически обусловлена персистирующим компрессионным воздействием на гистологические структуры в области грыжевых ворот.

Таким образом, совокупность полученных объективных данных не только подтверждает наличие вторичного воспалительного процесса, но и убедительно связывает его генез с патофизиологией ущемленной грыжи, где хроническая компрессия выступает в роли триггерного фактора, запускающего каскадную иммуно-воспалительную реакцию. Результаты морфологического исследования крови лабораторных животных после проведенной операции представлены на рисунке 3.

К четырнадцатым суткам эксперимента динамика гематологических показателей демонстрировала выраженную положительную тенденцию. У животных всех опытных групп были зафиксированы значения, соответствующие физиологической норме для данного вида. Однако проведенный сравнительный анализ между группами выявил сохраняющуюся статистически значимую разницу ($p < 0,05$) в уровне лейкоцитов. Так, у крыс второй опытной группы среднее количество лейкоцитов превышало аналогичный показатель в первой группе на 21,5%.

Данное наблюдение может быть интерпретировано следующим образом: хотя интенсивность системного воспалительного ответа значительно снизилась, что подтверждается нормализацией абсолютных значений всех клеточных популяций и биохимических маркеров (включая СОЭ) до референсных пределов, у животных второй группы сохранялся остаточный, субклинический уровень иммунной активации.

Важно отметить, что само нахождение показателей в пределах нормы не исключает наличия слабовыраженного патологического процесса.

Референсные интервалы представляют собой статистический диапазон, и значения, находящиеся в его верхней трети, особенно в контексте отслеживания динамики у одного и того же субъекта,

Рис. 3. Морфологический состав крови лабораторных животных после операции на 14-е сутки

Fig. 3. Morphological composition of the blood of laboratory animals after surgery on the 14th day

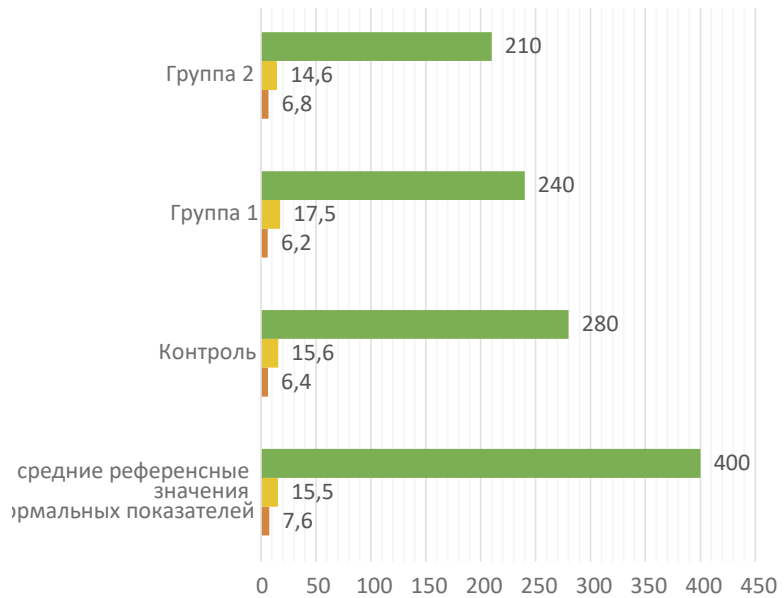
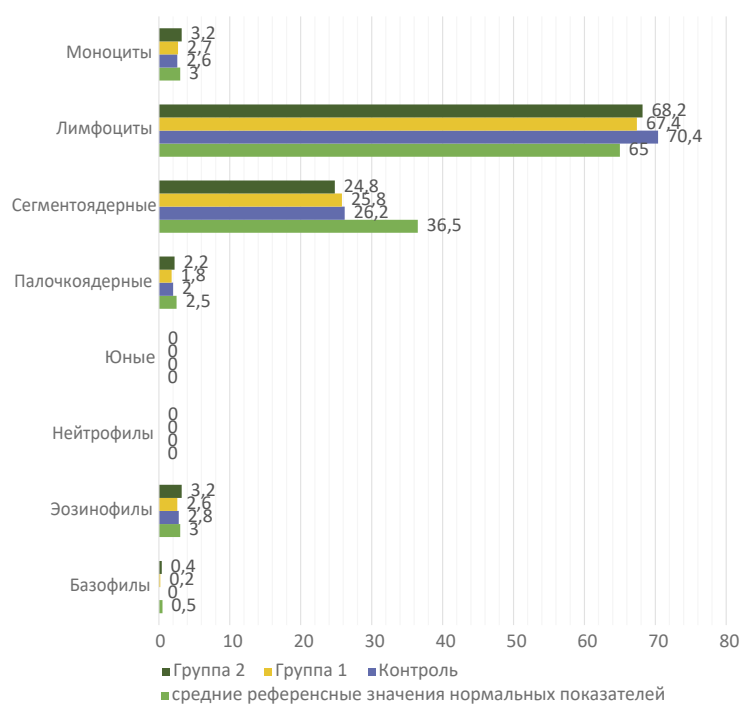


Рис. 4. Лейкоцитарный профиль крови лабораторных животных после операции на 14-е сутки

Fig. 4. Leukocyte profile of laboratory animals 14 days after surgery



могут указывать на сохраняющуюся физиологическую нагрузку.

Таким образом, сохраняющийся относительный лейкоцитоз во второй группе, даже в условиях формальной нормы, свидетельствует о более длительном периоде репарации и остаточной воспалительной активности.

Лейкоцитарный профиль представлен на рисунке 4.

На 14 сутки данные показатели вернулись к физиологическим нормам, но у животных второй опытной группы, по сравнению с показателями

Таблица 3. Изменение площади сетчатого импланта из титановой и полипропиленовой сетки

Table 3. Change in the area of the mesh implant made of titanium and polypropylene mesh

Вид сетчатого материала	Размер сетки до операции	Площадь импланта, см ² (M ± m)	
		30-е сут. после операции	90-е сут. после операции
Титановые нити	1/1,5 S = 1,5 cm	1,24 (1,1-1,46)	0,97 (0,92-1,21)
Полипропилен	1/1,5 S = 1,5 cm	1,37(1,26-1,47)	1,3 (1,07-1,46)

крови первой опытной группы, сохранялось повышенное количество лейкоцитов на 21,5%, базофилов на 40%, эозинофилов на 24,1%, палочкоядерных на 23,8%, сегментоядерных на 21,4%, лимфоцитов на 28,4%, моноцитов на 62,5%, что свидетельствовало о продолжающемся воспалительном процессе.

Однако все показатели крови находились в пределах физиологической нормы. Формальное нахождение показателей в референсных пределах не исключает, а маскирует активный патофизиологический процесс.

Выявленный дисбаланс является не признаком острого деструктивного воспаления, а отражением фазы активного ремоделирования и иммунной регуляции. У животных второй группы, по сравнению с первой, процесс восстановления протекает более интенсивно.

Для оценки степени сморщивания сетчатых имплантов определяли их площадь при ультразвуковом и физикальном исследовании на 30-и и 90-е сутки после операции.

Результаты исследований представлены в таблице 3.

Сравнение с предыдущими исследованиями выявило статистически значимое преимущество имплантов из титановой нити. Установлено, что степень контракции (сморщивания) данных имплантов на 30% ниже по сравнению с традиционными сетчатыми имплантами из полипропилена.

Данный факт свидетельствует о существенно более низком уровне постимплантационной деформации и, как следствие, о лучшей интеграции титанового имплантата с окружающими тканями. Меньшая степень сморщивания является критически важным показателем, так как напрямую коррелирует с частотой послеоперационных осложнений, таких как хронический болевой синдром, рецидив грыжи и нарушение анатомической топографии.

Результаты проведенного клинического наблюдения за лабораторными животными в послеоперационном периоде полностью коррелируют с объективными морфометрическими данными.

Было зафиксировано, что у животных первой опытной группы (с титановыми имплантатами) нормализация общего соматического статуса и восстановление функциональной активности передней брюшной стенки происходили в более сжатые сроки по сравнению с группой, где использовались полипропиленовые аналоги. Это проявлялось в более раннем восстановлении двигательной активности, аппетита и отсутствии

признаков дискомфорта при пальпации операционной зоны.

К моменту снятия швов витальные показатели и поведенческие реакции животных в обеих группах визуально не отличались и соответствовали физиологической норме: особи были активны, сохраняли аппетит и не демонстрировали признаков беспокойства.

Однако, несмотря на внешнюю идентичность клинической картины к концу наблюдения, ключевое различие заключалось в динамике восстановления. Более быстрое и менее травматичное заживление в группе с титановыми имплантатами в ранние сроки создает предпосылки для формирования в долгосрочной перспективе полноценного и прочного рубца, а также снижает риски отдаленных послеоперационных осложнений.

Выводы/Conclusions

В соответствии с полученными данными, к исходу 14-х суток эксперимента у животных всех опытных групп было зафиксировано возвращение абсолютных гематологических показателей к установленным референсным значениям. Тем не менее, проведенный сравнительный межгрупповой анализ выявил устойчивые и статистически значимые различия в лейкоцитарной формуле. У крыс второй опытной группы, по сравнению с контрольной первой группой, сохранялось достоверно более высокое относительное содержание всех исследуемых популяций лейкоцитов: общее количество лейкоцитов +21,5%, базофилы +40%, эозинофилы +24,1%, палочкоядерные нейтрофилы +23,8%, сегментоядерные нейтрофилы +21,4%, лимфоциты +28,4%, моноциты +62,5%.

Выявленные устойчивые межгрупповые различия, особенно выраженные по всем линиям лейкопоза, являются ключевым диагностическим признаком.

Детальный анализ изменений в лейкоцитарной формуле позволяет сделать следующие выводы о характере процесса: синхронное увеличение всех субпопуляций лейкоцитов (от нейтрофилов до лимфоцитов и моноцитов) с наибольшим скачком у моноцитов (+62,5%) и базофилов (+40%) указывает на сохраняющуюся генерализованную стимуляцию костного мозга.

Это может быть обусловлено продолжающейся продукцией низкоуровневых количеств цитокинов (IL-3, GM-CSF), действующих на стволовые клетки-предшественники; повышение лимфоцитов (+28,4%) свидетельствует о переходе от неспецифического воспалительного ответа к фазе специфического иммунного ответа; значительный рост

моноцитов (+62,5%) говорит об активной фазе ремоделирования поврежденных тканей. Моноциты, мигрируя в очаг, дифференцируются в макрофаги, которые фагоцитируют некротические массы и инициируют ангиогенез и фиброплазию.

Рост эозинофилов (+24,1%) и базофилов (+40%) в контексте асептического воспаления при компрессии указывает на роль тучных клеток в регуляции локального воспаления и реакции на продукты распада тканей.

Полученные данные согласуются с известными физико-механическими свойствами материалов. Выраженное сморщивание полипропиленовой сетки «ЭСФИЛ» (более 20%) объясняется, вероятно, интенсивной тканевой реакцией на полипропилен, которая завершается формированием плотной фиброзной капсулы и контракцией нитей. Меньшая степень сморщивания титановой сетки «Титановый шелк» (менее 6%), по-видимому, обусловлена высокой биосовместимостью титана, его инертностью и микроструктурой

волокна, что способствует более мягкому врастанию тканей без грубой рубцовой деформации самого имплантата.

Таким образом, в условиях экспериментального моделирования промежностных грыж у крыс имплантат «Титановый шелк» продемонстрировал существенно более высокую стабильность геометрических параметров по сравнению с полипропиленовой сеткой «ЭСФИЛ», что позволяет прогнозировать его преимущество в профилактике рецидивов, связанных с деформацией и смещением трансплантата.

В качестве рекомендаций для ветеринарных специалистов можно применять для животных с промежностными грыжами сетчатый имплантат на основе титана в виде сетки титановой для армирующей пластики мягких тканей «Титановый шелк» производителя Ti-Light, которая фиксируется с помощью титанового шовного материала «Титанелл» представленного мононитью размером 4/0.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Moiş E. *et al.* Perineal Hernia Mesh Repair Using Only the Perineal Approach: How We Do It. *Journal of Personalized Medicine*. 2023; 13(10): 1456. <https://doi.org/10.3390/jpm13101456>
2. Balla A. *et al.* Perineal hernia repair after abdominoperineal excision or extralevator abdominoperineal excision: a systematic review of the literature. *Techniques in Coloproctology*. 2017; 21(5): 329–336. <https://doi.org/10.1007/s10151-017-1634-8>
3. McKenna N.P., Habermann E.B., Larson D.W., Kelley S.R., Mathis K.L. A 25 year experience of perineal hernia repair. *Hernia*. 2020; 24(2): 273–278. <https://doi.org/10.1007/s10029-019-01958-0>
4. Bertrand K. *et al.* The management of perineal hernia following abdomino-perineal excision for cancer. *Hernia*. 2020; 24(2): 279–286. <https://doi.org/10.1007/s10029-019-01927-7>
5. Musters G.D. *et al.* Biological Mesh Closure of the Pelvic Floor After Extralevator Abdominoperineal Resection for Rectal Cancer: A Multicenter Randomized Controlled Trial (the BIOPEX-study). *Annals of Surgery*. 2017; 265(6): 1074–1081. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002020>
6. Лазаренко В.А., Иванов И.С., Ушанов А.А., Мишина Е.С., Обедков Е.Г., Костин В.С. Грыжа или грыжевой дефект? Экспериментальные модели на лабораторных животных в герниологии. *Инновационная медицина Кубани*. 2023; 8(3): 114–120. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2023-26-3-114-120>
7. Martijnse I.S., Holman F., Nieuwenhuijzen G.A.P., Rutten H.J.T., Nienhuijs S.W. Perineal Hernia Repair After Abdominoperineal Rectal Excision. *Diseases of the Colon & Rectum*. 2012; 55(1): 90–95. <https://doi.org/10.1097/DCR.0b013e3182334121>
8. Бердова Е.Д., Медведева Л.В. Бактериологическая характеристика заживления кожных ран после применения биоклея «Сульфакриллат». *Аграрная наука — сельскому хозяйству. Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции*. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет. 2024; 2: 128–129. EDN BNMPIT
9. Косовцова Н.В., Бирюля Н.И., Овсянников Ф.А., Хацко С.Л., Зеленина Е.В., Федоренко А.В. Влияние селективного ингибитора специфической фосфодиэстеразы-5 на формирование легких при ложной диафрагмальной грыже плодов крыс. *Трансляционная медицина*. 2024; 11(5): 456–464. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2024-11-5-456-464>

REFERENCES

1. Moiş E. *et al.* Perineal Hernia Mesh Repair Using Only the Perineal Approach: How We Do It. *Journal of Personalized Medicine*. 2023; 13(10): 1456. <https://doi.org/10.3390/jpm13101456>
2. Balla A. *et al.* Perineal hernia repair after abdominoperineal excision or extralevator abdominoperineal excision: a systematic review of the literature. *Techniques in Coloproctology*. 2017; 21(5): 329–336. <https://doi.org/10.1007/s10151-017-1634-8>
3. McKenna N.P., Habermann E.B., Larson D.W., Kelley S.R., Mathis K.L. A 25 year experience of perineal hernia repair. *Hernia*. 2020; 24(2): 273–278. <https://doi.org/10.1007/s10029-019-01958-0>
4. Bertrand K. *et al.* The management of perineal hernia following abdomino-perineal excision for cancer. *Hernia*. 2020; 24(2): 279–286. <https://doi.org/10.1007/s10029-019-01927-7>
5. Musters G.D. *et al.* Biological Mesh Closure of the Pelvic Floor After Extralevator Abdominoperineal Resection for Rectal Cancer: A Multicenter Randomized Controlled Trial (the BIOPEX-study). *Annals of Surgery*. 2017; 265(6): 1074–1081. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002020>
6. Lazarenko V.A., Ivanov I.S., Ushanov A.A., Mishina E.S., Obedkov E.G., Kostin V.S. Hernia or hernia Defect? Experimental herniology Models in Laboratory Animals. *Innovative Medicine of Kuban*. 2023; (3): 114–120 (in Russian). <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2023-26-3-114-120>
7. Martijnse I.S., Holman F., Nieuwenhuijzen G.A.P., Rutten H.J.T., Nienhuijs S.W. Perineal Hernia Repair After Abdominoperineal Rectal Excision. *Diseases of the Colon & Rectum*. 2012; 55(1): 90–95. <https://doi.org/10.1097/DCR.0b013e3182334121>
8. Berdova E.D., Medvedeva L.V. Bacteriological characteristics of healing skin wounds after the application of biological glue "Sulfacrylate". *Agrarian science for agriculture. Collection of materials from the XIX International scientific and practical conference*. Barnaul: Altai State Agrarian University. 2024; 2: 128–129 (in Russian). EDN PILJSB
9. Kosovtsova N.V., Birulya N.I., Ovsyannikov F.A., Khatsko S.L., Zelenina E.V., Fedorenko A.V. Effect of tadalafil on pulmonary hypoplasia in congenital diaphragmatic hernia of rat fetuses. *Translational Medicine*. 2024; 11(5): 456–464 (in Russian). <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2024-11-5-456-464>

10. Золотухина В.А., Безрук Е.Л. Патологоанатомическая картина при ожоговой токсемии у крыс в эксперименте. *Ветеринарная хирургия: от истока к современности. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения профессора, доктора ветеринарных наук Г.С. Мاستыко*. Витебск: Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины. 2022; 56–59. EDN PILJSB

11. Пономарева И.В., Цуканов А.В., Иванов И.С., Затолокина М.А., Горюшкин Е.И., Главиш И.С. Использование коллагенстимулирующих покрытий для герниоимплантатов: сравнение морфологических характеристик ткани в зоне имплантации. *Современные проблемы науки и образования*. 2023; (2). <https://doi.org/10.17513/spno.32498>

12. Дудинский А.Н., Гарелик П.В., Мармыш Г.Г., Прокопчик Н.И. Патоморфологические особенности реакции тканей при пластике дефекта передней брюшной стенки у животных сетчатым полипропиленовым трансплантатом. *Хирургия. Восточная Европа*. 2023; 12(3): 274–283. <https://doi.org/10.34883/Pl.2023.12.3.020>

13. Ревякин И.В., Медведева Л.В., Петренко В.А. Клинико-морфологическая оценка эффективности применения новых методов лечения кожных ран у животных в сравнительном аспекте. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017; (9): 165–170. EDN ZGBVQP

14. Армашов В.П. и др. Результаты применения противоспаечных барьерных средств Адепт и Мезогель при интраперитонеальной пластике (IPOM) в эксперименте. *Эндоскопическая хирургия*. 2024; 30(2): 48–65. <https://doi.org/10.17116/endoskop20243002148>

15. Абдувосидов Х.А. и др. Сравнительный морфологический анализ реакции соединительной ткани на имплантацию полипропиленовых эндопротезов. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2024; 44(3): 125–134. <https://doi.org/10.18699/SSMJ20240314>

16. Saha T., Wang X., Padhye R., Houshyar S. A review of recent developments of polypropylene surgical mesh for hernia repair. *OpenNano*. 2022; 7: 100046. <https://doi.org/10.1016/j.onano.2022.100046>

17. Köckerling F., Schug-Pass C. What do we know about titanized polypropylene meshes? An evidence-based review of the literature. *Hernia*. 2014; 18(4): 445–457. <https://doi.org/10.1007/s10029-013-1187-3>

18. Чернигова С.В., Чернигов Ю.В. Роль провоспалительных медиаторов в развитии септических осложнений у животных. *Ветеринарная патология*. 2011; (1–2): 92–96. EDN NZAUSD

19. Капралов С.В. и др. Экспериментальное обоснование выбора методики установки сетчатого имплантата при вентропластике передней брюшной стенки. *Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал)*. 2023; 7(4): 33–39. <https://doi.org/10.17116/operhirurg2023704133>

20. Chernigova S.V. et al. Special aspects of systemic inflammation course in animals. *Veterinary World*. 2019; 12(7): 932–937. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.932-937>

ОБ АВТОРАХ

Татьяна Николаевна Шнякина

доктор ветеринарных наук, доцент, профессор кафедры инфекционных болезней и ветеринарно-санитарной экспертизы
shnyakina-t@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0000-8685-4645>

Павел Николаевич Щербаков

доктор ветеринарных наук, доцент, профессор кафедры Инфекционных болезней и ветеринарно-санитарной экспертизы
scherbakov_pavel@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8685-4645>

Ксения Вадимовна Степанова

кандидат биологических наук, доцент кафедры инфекционных болезней и ветеринарно-санитарной экспертизы
deratizator@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3916-004X>

Южно-Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Ю.А. Гагарина 13, Троицк, 457100, Россия

10. Zolotukhina V.A., Bezruk E.L. Pathological findings in experimental burn toxemia in rats. *Veterinary Surgery: From the Past to the Present. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Professor, Doctor of Veterinary Sciences G.S. Mastyko*. Vitebsk: Vitebsk Order of “the Badge of Honor” State Academy of Veterinary Medicine. 2022; 56–59 (in Russian). EDN PILJSB

11. Ponomareva I.V., Tsukanov A.V., Ivanov I.S., Zatolokina M.A., Goryushkin E.I., Glavisch I.S. Use of collagen-stimulating coatings for hernia implants: comparison of morphological characteristics of tissue in the implantation area. *Modern problems of science and education*. 2023; (2) (in Russian). <https://doi.org/10.17513/spno.32498>

12. Dudzinski A.N., Harelik P.V., Marmysh G.G., Prokopchik N.I. Morphological Features of Tissue Response in Surgical Repair of Anterior Abdominal Wall Defect Using Polypropylene Mesh in Animals. *Surgery. Eastern Europe*. 2023; 12(3): 274–283 (in Russian). <https://doi.org/10.34883/Pl.2023.12.3.020>

13. Revyakin I.V., Medvedeva L.V., Petrenko V.A. Comparative clinical and morphological evaluation of the efficiency of using new treatment methods for skin wounds in animals. *Bulletin of Altai State Agriculatural University*. 2017; (9): 165–170 (in Russian). EDN ZGBVQP

14. Armashov V.P. et al. Results of the use of adhesion barriers Adept and Mesogel in intraperitoneal onlay mesh (IPOM) in the experiment. *Endoscopic Surgery*. 2024; 30(2): 48–65 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/endoskop20243002148>

15. Abduvosidov Kh.A. et al. Comparative morphological analysis of connective tissue response to polypropylene endoprosthesis implantation. *Siberian Scientific Medical Journal*. 2024; 44(3): 125–134 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/SSMJ20240314>

16. Saha T., Wang X., Padhye R., Houshyar S. A review of recent developments of polypropylene surgical mesh for hernia repair. *OpenNano*. 2022; 7: 100046. <https://doi.org/10.1016/j.onano.2022.100046>

17. Köckerling F., Schug-Pass C. What do we know about titanized polypropylene meshes? An evidence-based review of the literature. *Hernia*. 2014; 18(4): 445–457. <https://doi.org/10.1007/s10029-013-1187-3>

18. Chernigova S.V., Chernigov Yu.V. The role of proinflammatory mediators in the development of septic complications in animals. *Russian Journal of Veterinary Pathology*. 2011; (1–2): 92–96 (in Russian). EDN NZAUSD

19. Kapralov S.V. et al. Experimental substantiation of the choice of the technique of mesh implant placement at ventroplasty of the anterior abdominal wall. *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy*. 2023; 7(4): 33–39 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/operhirurg2023704133>

20. Chernigova S.V. et al. Special aspects of systemic inflammation course in animals. *Veterinary World*. 2019; 12(7): 932–937. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.932-937>

ABOUT THE AUTHORS

Tatyana Nikolaevna Shnyakina

Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Infectious Diseases and Veterinary and Sanitary Expertise
shnyakina-t@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0000-8685-4645>

Pavel Nikolaevich Shcherbakov

Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Infectious Diseases and Veterinary and Sanitary Expertise
scherbakov_pavel@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8685-4645>

Ksenia Vadimovna Stepanova

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Infectious Diseases and Veterinary and Sanitary Expertise
deratizator@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3916-004X>

South Ural State Agrarian University, 13 Gagarin st., Troitsk, 457100, Russia

УДК 504.5

Научный обзор



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-29-44

А.А. Лукин^{1, 2} ✉А.Л. Вебер³Т.А. Исригова⁴М. Жиарно⁵

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Челябинская обл., Россия

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

³Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Россия

⁴Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, Махачкала, Россия

⁵Варшавский университет естественных наук, Варшава, Польша

✉ lukin3415@gmail.com

Поступила в редакцию: 20.10.2025

Одобрена после рецензирования: 11.02.2026

Принята к публикации: 25.02.2026

© Лукин А.А., Вебер А.Л., Исригова Т.А., Жиарно М.

Review



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-29-44

Aleksandr A. Lukin^{1, 2} ✉Anna L. Veber³Tatyana A. Isrigova⁴Małgorzata Ziarno⁵

¹South Ural State Agrarian University, Troitsk, Chelyabinsk region, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

⁴Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Makhachkala, Russia

⁵Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Poland

✉ lukin3415@gmail.com

Received by the editorial office: 20.10.2025

Accepted in revised: 11.02.2026

Accepted for publication: 25.02.2026

© Lukin A.A., Veber A.L., Isrigova T.A., Ziarno M.

Негативное воздействие микропластика на здоровье сельскохозяйственных животных и качество продукции животноводства

РЕЗЮМЕ

В данном обзоре был проведен анализ научной литературы, посвященной воздействию микропластика на здоровье явчатных, свиней и птиц, а также на их продуктивные показатели и характеристики мясной продукции. Результаты контролируемых экспериментов свидетельствуют о локальном негативном воздействии микропластика на состояние здоровья скота и птицы, проявляющемся в виде окислительного стресса, воспалительных процессов и апоптоза, возникающих после краткосрочного воздействия концентраций, превышающих типичные для окружающей среды. Остается невыясненным, оказывает ли микропластик системное влияние на заболеваемость, продуктивность и общее состояние животных при уровнях воздействия, близких к естественным. Наличие микропластика в тканях сельскохозяйственных животных и птиц в концентрациях, которые потенциально могут вызывать опасения у потребителей, указывает на возможную проблему безопасности пищевой продукции. Используемые методы обнаружения микропластика подвержены загрязнению, что создает неопределенность в отношении истинных концентраций, а также в отношении источников микропластика: является ли он результатом производственного процесса, переработки или упаковки мяса. Существующие данные не позволяют установить корреляцию между воздействием микропластика и продуктивностью животных, не дают полной картины общего количества и типов микропластика, который оказывает влияние на сельскохозяйственных животных и птиц. Сегодня отсутствуют исследования, посвященные изучению источников микропластика и разработке эффективных мер по снижению его воздействия в цепочках поставок животноводческой продукции. Предварительные данные указывают на то, что микропластик может выступать в качестве переносчика тяжелых металлов, антибиотиков, генов устойчивости к антибиотикам и микроорганизмов. Необходимы дальнейшие исследования для количественной оценки воздействия микропластика в качестве переносчика загрязняющих веществ. Присутствие микропластика в системах производства животноводческой и птицеводческой продукции представляет собой потенциальную угрозу благополучию животных, их продуктивности и восприятию мясной продукции потребителями.

Ключевые слова: микропластик, загрязнение, продукция животноводства, птицеводство, безопасность пищевых продуктов, скотоводство, контаминация, идентификация

Для цитирования: Лукин А.А., Вебер А.Л., Исригова Т.А., Жиарно М. Негативное воздействие микропластика на здоровье сельскохозяйственных животных и качество продукции животноводства. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 29–44. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-29-44>

The negative impact of microplastics on the health of farm animals and the quality of livestock products

ABSTRACT

The increasing volume of microplastics generated, their widespread distribution in agricultural areas, the potential for ingestion by farm animals and poultry, and the potential impact on their productivity and meat quality make microplastics a risk factor for the livestock and poultry industries. This scientific review analyzes the scientific literature on the impact of microplastics on the health of ruminants, pigs, and poultry, as well as on their productivity and meat product characteristics. It is noted that the results of controlled experiments indicate localized negative impacts of microplastics on the health of livestock and poultry, manifested as oxidative stress, inflammation, and apoptosis following short-term exposure to concentrations exceeding those typically found in the environment. However, it remains unclear whether microplastics have a systemic impact on disease incidence, productivity, and overall well-being of animals at exposure levels close to natural ones. The presence of microplastics in the tissues of farm animals and poultry at concentrations that could potentially raise consumer concerns indicates a potential food safety issue. However, the methods used to detect microplastics are susceptible to contamination, creating uncertainty regarding the true concentrations and the source of the microplastics, such as whether they arise from the production process, processing, or packaging of the meat. However, existing data do not allow for a correlation between microplastic exposure and animal performance, nor does it provide a complete picture of the total amount and types of microplastics to which farm animals and poultry are exposed. To date, there are no studies examining the sources of microplastics or developing effective measures to reduce their impact in livestock supply chains. Preliminary data indicate that microplastics can act as carriers of heavy metals, antibiotics, antibiotic resistance genes, and microorganisms. Further research is needed to quantify the impact of microplastics as a contaminant carrier. Thus, the presence of microplastics in livestock and poultry production systems poses a potential threat to animal welfare, animal productivity and consumer acceptance of meat products.

Key words: microplastics, pollution, livestock products, poultry, food safety, livestock, contamination, identification

For citation: Lukin A.A., Veber A.L., Isrigova T.A., Ziarno M. Negative impact of microplastics on the health of farm animals and the quality of livestock products. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 29–44 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-29-44>

Введение/Introduction

Мелкие частицы пластика представляют собой серьезную угрозу для животноводства и птицеводства. Это обусловлено их устойчивостью в окружающей среде, воздействием на здоровье животных, их продуктивность, способностью накапливаться в продуктах питания [1–4].

Микропластик накапливается как в воде, так и на суше, определяясь как пластиковые частицы размером от 0,1 мкм до 5 мм. В сельском хозяйстве основными источниками микропластика являются пластиковая пленка, применяемая в теплицах, силос и пластиковая мульча, отходы, используемые для удобрений, такие как осадок сточных вод, вода для орошения, пластиковые трубы и оборудование, а также загрязненные корма. Со временем пластик разрушается под воздействием ультрафиолетового излучения и других факторов, что ведет к образованию и распространению микропластиковых частиц. Это важно, поскольку домашний скот и птица могут заглатывать или впитывать эти частицы из окружающей среды [5].

Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов полагает, что пластиковые частицы размером более 150 мкм выводятся из организма с фекалиями, в то время как более мелкие частицы могут проникать через желудочно-кишечный барьер и накапливаться в органах и тканях животных.

Установлено наличие микропластика в фекалиях крупного рогатого скота, курином помете и свиных фекалиях. Кроме того, исследования показывают, что проглоченные частицы микропластика перемещаются из кишечника в другие ткани (мышцы). Обнаружение микропластика в крови крупного рогатого скота и свиней, а также в говядине и свинине, приобретенной в розничных магазинах, вызывает опасения. Микропластик может вызывать воспаление, окислительный стресс и апоптоз клеток животных, тем самым негативно влияя на их здоровье и продуктивность. Наличие микропластика в мясных продуктах представляет опасность для здоровья человека, потенциально приводя к репродуктивной токсичности и нарушениям развития [6–10].

Взрослые люди в США потребляют значительное количество частиц микропластика в год из продуктов питания. Принимая во внимание потенциальные последствия для безопасности пищевых продуктов и доступности рынков, а также продуктивности скота, регулирование, затрагивающее производителей животноводческой продукции, должно быть обосновано надежными научными данными.

Согласно требованиям Европейской комиссии (2011 г.), пластиковые упаковочные материалы не должны высвобождать в пищевые продукты более 60 мг/кг пластмассового вещества.

В Великобритании установлен предел содержания пластиковых материалов в упаковке продуктов питания, используемой для приготовления кормов для животных, составляющий всего лишь 0,15% по массе среди пищевых отходов [11]. Нидерланды требуют удаления всей пластиковой упаковки из кормовых смесей перед подачей их сельскохозяйственным животным для предотвращения попадания пластика в организм животных [12].

Микроскопический уровень загрязнения мяса пластиком ставит под угрозу безопасность потребляемых человеком продуктов питания, снижает доверие потребителей и ограничивает экспорт мясной продукции. Поэтому нормы и правила, регулирующие производство животного сырья, должны основываться исключительно на надежных научных исследованиях [13–16] и фактических данных [17–22].

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Поиск литературы проводился без ограничений по дате публикации исследования, типу публикации или языку статьи, хотя большинство поисковых терминов вводились на английском и русском языках.

Обзор составлен в основном на публикациях зарубежных авторов, анализ научных статей охватывает период с 2015 по 2025 год включительно.

Поиск потенциально релевантных статей производился по ключевым словам в электронных базах данных Scopus¹, Sci-Hub² и ELIBRARY.RU³, поисковой системы «Google Академия».

При выборе статей для обзора приоритет отдавали источникам с большим количеством цитирования. Также были изучены списки литературы отобранных публикаций для выявления дополнительных релевантных источников информации.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

1. Влияние на здоровье сельскохозяйственных животных

Крупный рогатый скот (КРС)

Изучение эффектов воздействия микропластика на состояние здоровья и продуктивность КРС началось относительно недавно. Например, исследование Tassone S. и др. (2024) оценивало воздействие трех различных дозировок полиэтилентерефталата (PET) на процесс переработки пищи в преджелудке и кишечнике жвачных, применялся аппарат Ankom Daisy II (рисунок 1).

Результаты показали, что введение PET негативно влияет именно на усваиваемость сырого протеина и нейтрально-детергентной клетчатки, тогда как остальные параметры остались почти без изменений [23].

¹ <https://www.scopus.com/pages/home>

² Sci-Hub

³ <https://elibrary.ru/>

Рис. 1. Ankom Daisy II
Fig. 1. Ankom Daisy II



При проведении эксперимента использовалась одна емкость для каждой дозы PET, поэтому настоящая репликация не проводилась, а отдельные фильтры выполняли роль псевдорепликатов. В другом исследовании Chen J. и др. установили отсутствие значимого эффекта четырех концентраций полистирольных (PS) микропластиков размером 5 и 15 мкм на ферментацию рубцовой жидкости и последующее усвоение сухого вещества кормовых смесей после анализа методом *in vitro* [24]. Однако выводы *in vitro* ограничены, поскольку не учитывают всасывание организмом питательных веществ и взаимодействие между микроорганизмами и стенками кишечника [25]. По этой причине эксперименты *in vitro* требуют обязательного подтверждения *in vivo*, хотя полученные значения будут меньше выраженными [26].

Chang X. и др. (2024) провели опыт с применением внутримышечного введения полистирола (PS) (150 мг ежедневно) овцам породы Хулен-Буйр в течение 60 суток, варьируя размер частиц (от 0 до 50 мкм). Было обнаружено, что увеличение диаметра частиц вызывало значительные повреждения слизистой оболочки тонкого кишечника и снижение привеса, потребления питательных веществ, pH рубца, несмотря на стабильное потребление сухого вещества [27]. Такие нарушения сопровождалось увеличением числа бактерий родов *Bacteroidetes*, *Prevotellaceae* и *Actinobacteria* и уменьшением количества микроорганизмов, участвующих в расщеплении целлюлозы, включая группу *Coriobacteriales*. Параллельно наблюдалось повышение уровней воспалительных маркеров и усиление окислительного стресса организма, вызванного большими частицами PS [27]. Измененные характеристики мышечной ткани, такие как цвет мяса, консистенция и уровень pH, свидетельствуют о негативном влиянии больших частиц пластмассы на организм животного. Необходимо учитывать, что в работе использовался лишь один вид диеты и фиксированная доза пластика, что затрудняет интерпретацию результатов. Отсутствие данных о присутствии PS в тканях, органах и продуктах выделения исследуемых животных оставляет открытым вопрос о распределении пластиковых частиц

и возможных рисках для потребителей продукции животноводства.

Свиньи

Влияние абсорбции или аккумуляции микропластика на качество свиного мяса напрямую не изучалось. Вместо этого научные работы фокусировались на воздействии микропластиков на здоровье и общее состояние свиней. Например, van der Veen I и др. (2022) исследовали воздействие частиц PS размером 1-10 мкм в концентрациях от 0 до 1000 мкг/мл на клетки семенников свиньи *in vitro* в течение суток [12]. Результаты показали значительное усиление воспалительных процессов, апоптоза, некроза и активацию соответствующих сигнальных путей во всех тестируемых группах. Даже минимальная использованная в эксперименте концентрация (250 мкг/л) была обоснована предварительными тестами, указавшими на дозозависимое снижение жизнеспособности клеток при концентрации PS от 125 мкг/л. Данное «низкое» значение концентрации довольно велико в сравнении с другими исследованиями, и маловероятно достижение такой концентрации микропластика *in vivo* в яйцах. Следовательно, это исследование может быть релевантным только для процедур искусственного оплодотворения.

В исследовании Gałęcka I. и др. (2024) свиньям давали 0, 0,1 или 1 г PET в день в желатиновых капсулах на протяжении 28 дней [28]. Не было зафиксировано влияния на рост или смертность. Гистологический анализ двенадцатиперстной кишки на 28-й день выявил аномальное накопление слизи, энтероцитов на поверхности ворсинок, образование кровеносных сосудов, скопление бокаловидных клеток и гиперемия у свиней, получавших любую дозу микропластика PET. Стоит отметить, что в упомянутом исследовании применялись частицы PET размером от 1 до 300 микрометров. Животные содержались группами (по пять голов в каждой клетке) в стандартизированных условиях, что, возможно, повлияло на полученные данные. Важно также то, что оба исследования ограничили использование однотипных первичных частиц микропластика, которые вряд ли полностью отражают разнообразие микропластика, присутствующего в реальных условиях свиноводства.

Птица сельскохозяйственная

В отличие от исследований наличия микропластика у жвачных и свиней, основная масса работ по этой теме сосредоточена на домашней птице, в особенности на курах, хотя и утки становились объектами изучения. В научной литературе можно найти данные о 15 контролируемых экспериментах, в которых молодым цыплятам перорально вводили чистый пластик⁴ [29–41, 42]. В девяти из этих исследований использовалась идентичная схема для изучения влияния 5-мкм частиц PS, добавляемых в питьевую воду цыплят в различных

⁴ Ritchie H. How much of the world's food production is dependent on pollinators? Our World in Data. August 2, 2021. <https://ourworldindata.org/pollinator-dependence>

концентрациях (низкой, средней и высокой) в течение 42 дней [42]. Оценку эффектов производили с применением гистологического анализа, просвечивающей электронной микроскопии, коммерческих тест-систем для измерения параметров окислительного стресса, воспалительных процессов и апоптоза, а также методов количественной ПЦР с обратной транскрипцией и вестерн-блоттинга.

Только одна из этих работ была посвящена изучению влияния продолжительности воздействия микропластика на цыплят, ограничиваясь лишь низкими и высокими концентрациями, при этом подопытные птицы подвергались воздействию микропластика, содержащегося в питьевой воде на протяжении 28 или 48 суток [30]. По завершении каждого эксперимента цыплят подвергали эвтаназии с последующим отбором образцов тканей из селезенки, двенадцатиперстной кишки, слепой кишки, печени, тимуса, почек, сердца, легких, мозжечка и яичек. В большинстве исследований обнаруживались патологические изменения и инфильтрация воспалительных клеток в исследуемых тканях. Данные эффекты проявлялись даже при низких или средних концентрациях микропластика и усугублялись с ростом концентрации. Существенные перемены были отмечены в показателях, связанных с регуляцией окисления, воспалительными факторами и факторами апоптоза, что указывает на окислительный стресс, воспаление и апоптоз во всех тканях, подвергшихся анализу. Ряд исследований также зафиксировал активацию путей, вовлеченных в воспаление или апоптоз в образцах, взятых у птиц, подвергшихся воздействию микропластика. Эти реакции проявлялись даже при низких и средних концентрациях микропластика. При анализе конкретных показателей были выявлены некоторые расхождения в результатах между разными исследованиями и типами тканей. К примеру, содержание малонового диальдегида (индикатора окислительного стресса) в ткани миокарда значительно возросло при воздействии низкой концентрации микропластика [29], в то время как в тимусе — при средней [31]. Причины этих различий остались невыясненными.

Три контролируемых эксперимента, оценивавших финальную массу тела, не выявили существенного влияния микропластика ни в одной из использованных концентраций [42]. Тем не менее, отмечалось значительное уменьшение итоговой массы тимуса, конечного веса почек, конечного веса сердца и конечного веса легких, выраженного в процентах от массы тела, что указывает на потенциальное воздействие на выход продукции при убое и на долю мяса. Yin K. и др. (2022) и Yin K. и др. (2023) также зафиксировали значительное усиление проницаемости гематотестикулярного, кишечного-сосудистого и гематоэнцефалического барьеров. Вероятность воздействия на кур микропластика с одинаковым размером частиц и

типом полимера невелика, а это значит, что данные эффекты требуют подтверждения в стандартных условиях содержания птицы [43, 44].

В двух исследованиях микропластик вводили в корм птицам в дозировке 200 мг/кг на протяжении 28 суток. Li A. и др. (2023) изучали влияние частиц полиэтилена (PE) размером 1-10 мкм на содержимое тонкого кишечника, собственно кишечника, печень, почки и селезенку [45]. Zou W. и др. (2023) исследовали воздействие на содержимое слепой кишки, однако не указывали вид и величину использованного пластика, что затрудняет анализ и повторение исследования [46]. Кроме того, было отмечено, что в контрольном корме могло содержаться некоторое количество микропластика, поэтому его следовало рассматривать как дополнительный, а не как общее количество микропластика в рационе. Тем не менее, оба исследования показали заметное снижение конечной массы тела и среднесуточного прироста у цыплят, получавших частицы микропластика. Zou W. и др. (2023) не выявили воздействия микропластика на суточное потребление корма курами [46]. Li A. и др. (2023) сообщили, что употребление микропластика привело к падению антиоксидантной активности, а также к повреждению печени и воспалению, что было установлено по концентрации окислительных биомаркеров и на основании гистологического анализа [45]. Анализ, проведенный в обоих исследованиях, показал закономерное уменьшение микробного разнообразия и количества микроорганизмов в кишечнике кур при кормлении микропластиком.

Malik A. и др. (2024) в течение 112 дней скармливали микропластик курам, запаковывая его в тесто в количестве, составляющем 0, 20, 30 и 40% от суточного рациона [47]. Авторы измерили начальную и конечную массу тела и выявили значительное снижение роста веса в группе, получавшей 40%. Было установлено, что та же дозировка микропластика (40%) приводит к иммунной реакции у кур, что подтверждается увеличением общего количества лейкоцитов в крови. В исследовании не указаны фактические значения микропластика, тип или размер полимера, а также то, как приготовление микропластика в тесте повлияло на его характеристики.

Действие микрочастиц пластика на кур изучалось *in vitro* методами, как описано в работах [29] и [48]. В экспериментах кардиомиоциты подвергались влиянию различных концентраций PS частиц размером 5 мкм на протяжении 4, 12, 24 или 48 часов. Установлено, что при малых концентрациях PS (0,25 мг/л) рост кардиомиоцитов замедлялся и наблюдались аномалии в развитии клеток, причем эти эффекты усиливались с увеличением концентрации PS. Также было зафиксировано значительное повышение показателей окислительного стресса и пироптоза в кардиомиоцитах, подвергшихся воздействию как высоких, так и низких концентраций. Chatman и соавторы (2024)

изучали воздействие PE волокна или порошка размером 50 мкм в дозе 50 мг на содержимое слепой кишки кур с добавлением *S. enterica serovar Typhimurium* [48]. Существенных изменений в разнообразии микробиоты не выявлено. PE волокно или порошок сами по себе не оказывали влияния на метаболическую активность, при этом их сочетание с *S. enterica serovar Typhimurium* приводило к более выраженному эффекту, чем воздействие только PE, что указывает на эффект совместного воздействия.

Chen J. и соавторы (2023) использовали пероральный зонд для ежедневного введения PS цыплятам в контролируемых экспериментах, оценивая флуоресцентные и нефлуоресцентные PS отдельно [49]. К 35 дню у цыплят, получавших флуоресцентный PS, наблюдалось существенное увеличение финальной массы тела, веса тушки, грудных и ножных мышц. Отмечалось снижение накопления флуоресцентного PS в мышечной ткани ног с течением времени, в то время как в грудных мышцах его уровень оставался стабильным. Нефлуоресцентный PS также был связан с увеличением массы грудных и ножных мышц в группе с высокой дозой, однако не влиял на конечную массу тела или тушки. В группе с высокой дозой были отмечены значительные изменения показателей, свидетельствующие об окислительном стрессе и нейротоксичности. Несмотря на эти потенциальные риски для здоровья, они не повлияли на мясные продукты. Мясо стало более нежным, некоторые вкусовые метаболиты были подавлены, и наблюдались изменения в генах, регулирующих нервную функцию и развитие мышечных клеток у цыплят, получавших PS (0,1–0,5 мг 5-мкм частиц) ежедневно. Влияния на метаболизм печени или мышц не наблюдалось.

В двух контролируемых исследованиях изучалось влияние микропластика на уток. Chen Y. и соавторы (2024) подвергали уток воздействию флуоресцентного PVC (1 мг/л) через питьевую воду в течение 60 дней, с добавлением и без добавления кадмия (Cd) [49]. Потребление воды варьировалось, что указывало на возможные различия в дозировках между подопытными утками. Флуоресцентный PVC обнаруживался в печени животных, подвергшихся воздействию ПВХ и способствовал накоплению кадмия. Воздействие PVC, как с кадмием, так и без него, приводило к уменьшению размера печени, нарушениям мозгового слоя и инфильтрации воспалительных клеток. Также наблюдались изменения показателей, указывающих на окислительный стресс и апоптоз в печени.

Lu H. и соавторы (2023) аналогично подвергали уток воздействию частиц PS (10–100 мкм) в концентрации 1 мг/л через питьевую воду в течение 56 дней с добавлением и без добавления хлортетрациклина [50]. В группах, получавших PS с хлортетрациклином и без него, наблюдалось значительное снижение финальной массы тела, среднесуточного прироста и содержания сока в

мясе. Влияния на суточное потребление корма, pH или цвет мяса не отмечено. Были выявлены повреждения тощей кишки, а также изменения показателей, которые свидетельствуют об изменениях кишечного барьера, окислительном стрессе и кишечном воспалении.

Важным результатом обоих исследований с утками является взаимодействие микропластика PVC с другими биоактивными соединениями (Cd и хлортетрациклином). Эти взаимодействия показывают, что влияние микропластика на здоровье, продуктивность и качество мяса птицы может быть сложным и требует более комплексного рассмотрения взаимодействий микропластика с другими питательными и непитательными веществами.

2. Биоаккумуляция микропластика в тканях и мясных продуктах скота и птицы

Независимо от того, какое влияние оказывает микропластик на здоровье скота и птицы, его продуктивность и качество мяса, его присутствие значимо с точки зрения безопасности пищевых продуктов и потребительских предпочтений. Существуют доказательства биоаккумуляции микропластика в тканях животных. Например, Chen J. и коллеги (2023) использовали флуоресцентную спектроскопию для выявления частиц PS в мышечной ткани грудки и ножек цыплят уже через сутки после скормливания им флуоресцентных частиц PS размером 0,5, 5 или 50 мкм (n=24, по восемь птиц на каждый размер частиц) [24]. Те же исследователи обнаружили, что частицы PS размером 5 мкм приводили к более высокой концентрации в тканях по сравнению с другими размерами, что указывает на нелинейный характер накопления частиц в зависимости от их величины.

Shelver W.L. и соавторы (2024) давали 15 курам-несушкам частицы PS среднего размера 0,4 мкм в дозировке 11,1 мг/кг массы тела в желатиновых капсулах, вводившихся перорально [51]. Частицы PS были помечены радиоактивными индикаторами, а их радиоактивность измерялась через 1, 2, 3, 4 и 7 дней после приема. На основании данных о радиоактивности частицы PS были обнаружены в крови, яйцах, зобе, желудке, кишечнике, сердце, почках, печени, легких, селезенке, развивающихся эмбрионах и содержимом кишечника уже через сутки. Авторы отметили, что основная часть частиц PS была выведена с экскрементами (96,8%), а в тканях было обнаружено менее 1% от первоначальной дозы.

Wang M. и коллеги (2024) вводили куриным эмбрионам внутривенно частицы полистирола размером 0,15 или 1 мкм в концентрации 1, 2 или 5 г/мл [52]. Анализ с использованием флуоресцентной микроскопии выявил PS в аллантаоисной жидкости, а также в тканях сердца, печени, почек, кишечника, мозга, глаз и легких в период с 1,5 по 5,5 день после инъекции. В совокупности эти исследования демонстрируют быстрое воздействие микропластика, поступающего в организм птицы, на его концентрацию в тканях, что говорит о

наличии лишь короткого временного окна, в течение которого концентрация микропластика в тканях животных и мясных продуктах может уменьшиться после воздействия.

КРС

Несмотря на ограниченное количество исследований, микрочастицы пластика были обнаружены в тканях жвачных, включая мышечную ткань. В труде Bahrani F. и соавторов (2024) образцы говядины и баранины, приобретенные в пяти иранских магазинах, были проанализированы с соблюдением строгих мер предосторожности для исключения загрязнения [39]. Использовалась стерилизация оборудования, образцы укрывались алюминиевой фольгой, и проводились холостые пробы. Анализ выявил в среднем 130 частиц микропластика на килограмм баранины и 140 частиц на килограмм говядины. Схожие показатели (120 частиц микропластика на кг) были зафиксированы Milne M.H. и соавторами (2024) в стейке из вырезки, купленном в супермаркете США [53]. Даже при использовании фильтра с большим размером ячеек и исключении 66% частиц на основе холостых проб, микропластик все равно обнаруживался. van der Veen I. и коллеги (2022) применяли похожие методы коррекции и предотвращения загрязнения [12], что и Milne M.H. и др. (2024). Кроме того, с говядины, полученной с различных ферм и из розничных точек, удаляли поверхностный слой. В исследованной группе полимеров в говядине было обнаружено несколько типов пластика с концентрацией микрочастиц в пределах от 53 до 7700 мг/кг. Микропластик также был найден в крови крупного рогатого скота в концентрациях от 0,08 до 6,1 мг/кг.

Кроме того, выделение микропластиков производилось непосредственно с поверхности мяса путем промывания образцов и анализа промывочной воды. Nabib R.Z. и соавторы (2022) провели трехкратный анализ промывочной воды с двух кусков говядины и пяти кусков козлятины, которые были приготовлены на пластиковых разделочных досках разных типов и подвергнуты различным способам приготовления и мытья [54]. В козлятине было обнаружено от 70 до 7200 частиц микропластика на кг поверхности, что соответствует содержанию от 70 до 1640 мг микропластика на кг козлятины, включая частицы размером 15,5–13 089,8 мкм. В говядине было найдено от 1 до 6500 частиц микропластика на кг поверхности, что соответствует содержанию от 0 до 1620 мг на кг говядины, включая частицы размером от 14,8 до 5369,8 мкм. Важно отметить, что весь идентифицированный микропластик в образцах говядины и козлятины оказался PE. Таким образом, помимо потенциальной биоаккумуляции, загрязнение микропластиком после убоя скота также служит источником попадания микропластика в продукты животноводства, что имеет серьезные последствия для предприятий мясной промышленности и общественного питания.

Свиньи

В трех независимых исследованиях было констатировано присутствие микропластика в структуре свинины и изготовленных из нее субпродуктов. van der Veen I. и коллеги (2022) применили для отбора образцов свиного мяса и крови методику, идентичную той, что использовалась для анализа говядины [12]. В отобранных образцах свинины были идентифицированы разнообразные типы пластиковых полимеров с концентрацией в диапазоне от 63 до 690 мг/кг. Аналогично результатам, полученным при сопоставлении образцов говяжьей и бычьей крови, содержание микропластика в свиной крови оказалось ниже, чем в мышечной ткани, и составило 0,07–33,0 мг/кг.

Li H. и соавторы (2023) осуществили анализ десяти образцов легочной ткани (каждый весом 0,05 г), взятых у одной взрослой свиньи [40]. Согласно отчету, поляризационная микроскопия показала заметно меньшую концентрацию микропластика — 12 000 частиц на килограмм легочной ткани, по сравнению с данными лазерной прямой инфракрасной спектроскопии (LDIR), при использовании которой было выявлено 180 000 частиц микропластика на килограмм ткани легкого. Величина частиц микропластика, обнаруженного в образцах легочной ткани, по данным анализа LDIR, колебалась в пределах 20,3–916,4 мкм, что несколько меньше, чем при микроскопии в поляризованном свете (115,1–1370,4 мкм). Микропластик, найденный в тканях легких плода, был мельче, чем в тканях взрослой особи, и демонстрировал аналогичную закономерность: более высокая концентрация с меньшим размером частиц при анализе LDIR в сравнении с микроскопией.

С применением похожих, но менее детализированных методов, Hua Z-G. и коллеги (2021) обнаружили 9600 частиц микропластика на килограмм кишечной ткани свиньи, при этом большая часть (72,4%) имела размер менее 200 мкм [55]. В двух последних исследованиях были использованы образцы, полученные от свиней, выращенных вблизи очистных сооружений, что предполагает более высокую степень воздействия микропластика и потенциально завышенные концентрации в тканях. Это требует осторожности при экстраполяции данных на свиней из других систем и условий содержания.

Сравнительно низкая концентрация частиц микропластика, обнаруженная в свиной вырезке (200 частиц микропластика на килограмм свинины), может быть обусловлена несколькими факторами. В частности, для этих образцов применялся фильтр с более крупными порами, и 66% частиц микропластика были исключены для корректировки контрольных значений [53]. Эти результаты также подчеркивают необходимость осмотрительности при сопоставлении данных о микропластике, полученных разными методами оценки.

Отсутствуют исследования, посвященные изучению наличия микропластика на поверхности

свинины и возможности ее загрязнения через системы переработки или упаковки.

Птица сельскохозяйственная

В научной литературе зафиксировано лишь два исследования, посвященных выявлению микропластика в пробах мяса и тканей кур. Первое из них анализировало образцы трех кур породы Синхуа с соблюдением стандартных мер предосторожности от загрязнений. Однако в работе отсутствовали контрольные образцы для корректировки, а поверхностный слой не был удален с целью минимизации потенциального загрязнения уже после отбора проб [24]. Среди идентифицированных полимеров присутствовали PS, PA и PET. Микропластиковые частицы были обнаружены в печени (5,8–942,8 мг/кг), затем в мышцах ног (2,9–884,7 мг/кг), тонкой кишке (2,2–575,1 мг/кг) и грудной мышце (4,0–561,6 мг/кг). Дополнительный анализ с помощью инфракрасной спектроскопии показал, что большая часть частиц имела размеры от 0 до 30 мкм, и лишь небольшое количество достигало 200–300 мкм, что является максимальным зафиксированным размером.

Milne M.H. и др. (2024) выявили более низкие концентрации микропластика в куриной грудке (100 частиц микропластика на кг) по сравнению с куриными наггетсами (310 частиц микропластика на кг) [53]. Это может указывать на повышенный риск загрязнения микропластиком в процессе переработки. Действительно, как и в случае с продуктами из мяса жвачных животных, было установлено, что переработка мяса способствует попаданию микропластика в мясную продукцию из мяса сельскохозяйственных животных и птицы. Nabib R.Z. и др. (2022) исследовали промывную воду после разделки целой курицы мясниками на пластиковых разделочных досках [56]. Концентрация поверхностного микропластика на килограмм куриного мяса варьировалась от 30 до 1190 частиц, что соответствует 66–290 мг/кг. Размеры частиц, обнаруженных в промывной воде (74,6–178,3 мкм), были сопоставимы с размерами частиц, выявленных в образцах мяса.

Kedzierski M. (2020) проанализировали промывную воду не только мяса птицы из супермаркета, но и внутренней поверхности PS упаковки [57]. Было обнаружено меньшее количество поверхностного микропластика — от 4,0 до 18,7 частиц на кг, несмотря на использование фильтра с меньшим размером ячеек и отсутствие корректировки на холостые пробы. Эти исследования также демонстрируют расхождения в данных о микропластике, выраженных в количестве частиц или массе микропластика на единицу массы, что затрудняет сопоставление результатов исследований и установление единых стандартов.

3. Пути и источники попадания микропластика в организм скота и птицы

Микрочастицы пластика могут проникать в организм сельскохозяйственных животных и птиц через рот, дыхательные пути и кожу [58]. Исследования,

оценивающие объемы потребления микропластика скотом, играют ключевую роль в выявлении количества, разновидностей и размеров микропластиковых частиц, которым подвергается скот в различных производственных условиях. В настоящее время эти основополагающие знания отсутствуют. Имеются свидетельства о наличии микропластика в желудках и экскрементах сельскохозяйственных животных, но исследований других путей абсорбции и общего воздействия недостаточно [59]. Чтобы оценить текущую и прогнозируемую опасность микропластика для продуктивности и благополучия сельскохозяйственных животных, необходимы данные о наиболее значимых в экологическом плане способах его воздействия.

КРС

Предполагается, что поглощенный пластик и микропластик может подвергаться деградации и фрагментации в пищеварительной системе жвачных животных, что приводит к образованию большего количества мелких макро- и микрочастиц. Это предположение было выдвинуто Sheehan K.L. и коллегами (2022), которые поместили в рубец одной канюлированной коровы нейлоновую веревку длиной 2 см (20 000 мкм) и PE пленку, используемую для упаковки сена [60]. Через 54 дня масса пластика практически не изменилась, однако было зафиксировано значительное увеличение истирания пластиковых волокон и существенное уменьшение их длины.

Пищеварительная фрагментация пластика у жвачных животных была также подтверждена в исследовании *in vitro*, в котором PET инкубировали со свежей рубцовой жидкостью при температуре 40 °C в течение 72 часов [61]. Было показано, что рубцовая жидкость способна в некоторой степени разрушать PET, о чем свидетельствовало повышение активности эстеразы, образование продуктов гидролиза и обнаружение эрозии поверхности. Тем не менее, скорость деградации PET оказалась ниже по сравнению с биоразлагаемыми полиэфирами, такими как полибутиленадипаттерефталат и полиэтиленфураноат.

Аналогичные результаты были получены Galyon H. и коллегами (2023), которые обнаружили, что биоразлагаемые полимеры (полигидроксиалканоаты и полибутиленсукцинат-коадипат) фрагментируются уже после одного дня инкубации в рубце сухих канюлированных коров голштинской породы и подвергаются значительному разрушению в течение 60 дней инкубации [62]. Те же авторы сообщили, что PE низкой плотности не разрушается даже после 150 дней инкубации в рубце этих же коров.

Это указывает на то, что тип или смесь проглоченных пластиков оказывает существенное влияние на наличие и прохождение микропластика через руминоретикулум.

Свиньи

На текущий момент отсутствуют научные работы, исследующие наличие микропластика в

системе пищеварения свиней. При этом, зафиксировано проведение четырех научных исследований, посвященных выявлению микропластика в свином кале. В исследовании Mazzoleni S. и коллег (2023) был выполнен анализ проб фекалий, взятых ректально у свиней, диета которых включала либо исключала остатки пищи⁵. Микропластик не был обнаружен в фекалиях ни в одной из представленных групп, однако, в данном исследовании применялась длительная процедура переваривания образцов — одна неделя, что теоретически могло привести к разрушению пластиковых частиц. Несмотря на то, что авторы проводили предварительную проверку методики переваривания и не зафиксировали изменений цвета или формы при добавлении полипропилена, данные о степени восстановления не были представлены, и оценка проводилась только для трех проб и одного типа полимера. Yang J. и коллеги (2021) осуществили сбор дубликатов образцов фекалий с восьми различных свиноводческих ферм и идентифицировали 900 ± 1290 частиц микропластика на килограмм сырого веса фекалий [63]. Hua Z-G. и соавторы (2021) собрали свиной навоз с одной фермы и обнаружили более высокую концентрацию — 1250 частиц микропластика на килограмм сухого веса фекалий, при этом используя пластиковые фильтры из PA, что потенциально могло привести к загрязнению образцов [55]. Исследование Hua Z-G. и коллег (2021), основанное на анализе ректальных фекалий, собранных у неуточненного количества свиней с различных ферм, выявило в 100 раз более высокую концентрацию микропластиковых частиц — 112 000 на килограмм. Во всех четырех работах были приняты стандартные меры для предотвращения загрязнения образцов, и лишь в одном исследовании оценивалась степень извлечения образцов после разложения, которая варьировалась от 81,7 до 100% для PA, PP, PS, PE, PVC, вспененного PS, PA волокна и PE пленки.

Ни в одном из исследований не рассматривалась фрагментация микропластика в процессе пищеварения свиней.

Птица сельскохозяйственная

Ранее в научной литературе публиковались данные о присутствии микропластика в пищеварительной системе и выделениях птиц. Первые результаты в этой области представили Lwanga H.E. и коллеги (2017), однако их исследование не учитывало микрочастицы менее 2000 мкм и не содержало информации о количестве ферм, откуда были взяты образцы [64]. В исследованном корме были обнаружены только частицы размером более 5000 мкм. В среднем в желудках птиц находили 32 микропластиковых частицы, причем 84% из них превышали принятое определение микропластика, имея диаметр свыше 5000 мкм. Вероятно, измельчающее воздействие желудка могло

способствовать уменьшению размеров некоторых частиц микропластика.

Схожие результаты были получены в исследовании Bilal M. и соавторов (2023), которые обнаружили в среднем 33 частицы микропластика на желудок и 18 частиц на птицу, исследуя пробы с восьми птицеферм [65]. Leon L.I.D. с коллегами (2022) выявили микропластик в содержимом кишечника (5 из 7 образцов) и желудков (2 из 7 образцов), случайно приобретенных на семи различных рынках [66]. Из-за неясной связи между содержимым кишечника и желудков сравнение внутри одной птицы оказалось невозможным. Susanti R. и др. (2021) обнаружили микропластик в кишечном содержимом 25 уток из пяти регионов Индонезии, указав, что в каждом кишечнике содержалось от 11 до 49 микрочастиц, но не приводя общее среднее значение [67].

Работа Lwanga H.E. и соавторов (2017) обнаружила высокое содержание микропластика (129 800 частиц на кг) в двух образцах куриного помета [64]. Wu R.T. и коллеги (2021) при анализе дубликатов образцов фекалий с восьми птицеферм выявили значительно более низкую концентрацию микропластика (667 частиц на кг сырого веса), несмотря на использование фильтра с меньшим размером пор (0,22 мкм), чем в исследовании Lwanga H.E. и др. (2017) [68]. В исследовании Yan Z. и др. (2020) микропластик был найден в 4 из 10 образцов куриного помета, взятых с неуказанного числа ферм [69]. На основании анализа единственного образца помета было обнаружено 14 900 частиц микропластика на кг. Во всех упомянутых исследованиях применялись стандартные меры предосторожности для предотвращения загрязнения образцов микропластиком, однако только в одном исследовании сообщается о высокой степени восстановления (более 97%) для PE, PS и PVC. Отсутствие информации о системе выращивания, рационе и породе птиц ограничивает возможность распространения этих результатов на другие виды домашней птицы. Тем не менее, результаты подтверждают возможность обнаружения микропластика в пищеварительном тракте и экскрементах птиц.

На данный момент отсутствуют исследования, напрямую изучающие фрагментацию микропластика в пищеварительном тракте птиц. Однако концентрация микропластика, обнаруженная в мышечных желудках кур, была ниже, чем в зобе [65], что, вероятно, связано с механическим воздействием в мышечном желудке. Кроме того, микропластик, обнаруженный в курином помете, был меньшего размера, чем микропластик из мышечного желудка, что может указывать на дальнейшее разрушение частиц в процессе пищеварения.

Данный вопрос требует дальнейших исследований.

⁵ Mazzoleni S., Lin P., Luciano A., Tretola M., Pinotti L. Detection of microplastics in feces of pig fed former food products. FEED 2023: 8th International Feed Conference "Present and Future Challenges". 2023.

4. Источники микропластика

Животные, содержащиеся в хозяйствах, и птицы могут заглатывать микроскопические частицы пластика, поступающие из разнообразных элементов окружающей среды, таких как пища, грунт, водные ресурсы и атмосфера. Последняя также представляет собой возможный способ проникновения микропластика через дыхательные пути и его усвоение через слизистые оболочки.

Источниками микропластика могут выступать различные факторы в процессе производства животноводческой продукции, к примеру, пластиковое оборудование, применяемое при забое и обработке скота и птицы, а также пластиковая тара и упаковка, используемая для хранения и транспортировки мясных изделий. Тип, размер и количество обнаруживаемых частиц микропластика в продуктах животноводства зависят от источника и интенсивности воздействия.

Исследования, направленные на изучение происхождения загрязнения микропластиком, имеют огромную важность, так как они необходимы для определения актуального уровня микропластика, которому подвергается домашний скот. Установление точных показателей воздействия играет ключевую роль в проведении исследований по оценке влияния реалистичных уровней микропластика на здоровье, продуктивность и безопасность потребителей.

Возможные источники и пути контаминации мяса и мясных продуктов микропластиком представлены на рисунке 2.

Корма и кормовые продукты

Вероятно, корма являются основным путем попадания микропластика в организмы сельскохозяйственных животных и птиц. Изучение концентрации микропластика в кормах для скота проводилось в ограниченном количестве исследований. Например, Wu R. T. и коллеги (2021) проанализировали дубликаты образцов, собранных на 19 фермах, и обнаружили в корме для скота 36 ± 63 частиц микропластика на кг, в корме для свиней — 139 ± 115 частиц микропластика на кг, а в корме для кур — 96 ± 109 микропластиковых частиц на кг [68]. Наиболее часто встречающимся полимером оказался PE, который также был идентифицирован во внутреннем слое пластиковой упаковки для корма.

В другом исследовании, проведенном Xu J. и коллегами (2022) на 15 фермах в одном из регионов Китая, в кормах для свиней были обнаружены только два типа пластиковых полимеров [70]. PET был найден в 44 из 45 образцов со средней концентрацией 0,15 мг/кг сухого веса,

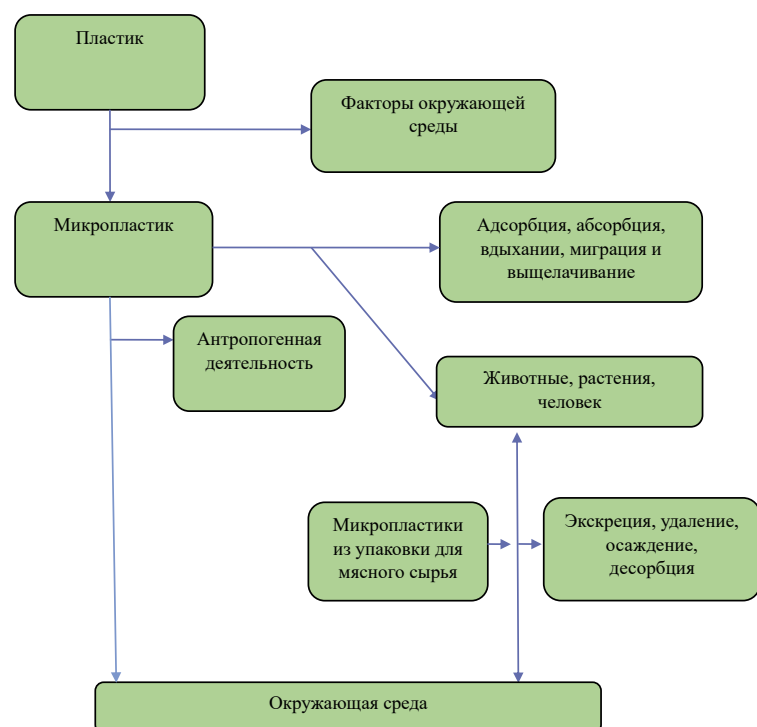
а поликарбонат — в 4 из 45 образцов в концентрации 0,006–0,09 мг/кг сухого веса. Расчетная норма потребления PET свиньями составила 0,80–7,79 мкг/кг массы тела в день.

В свою очередь, van der Veen I. и коллеги (2022) оценили наличие различных типов полимеров ($n=6$) в продуктах супермаркетов и выявили более высокие концентрации (39–2600 мг/кг) в образцах, содержащих PE, PS и PVC [12]. Микропластик не был обнаружен в свежих грубых кормах. Sheehan K.L. и коллеги (2022) идентифицировали PE, обработанный фталатами, в коммерческих минеральных смесях, однако не предоставили количественные данные о количестве или числе протестированных образцов, а также не описали меры по предотвращению загрязнения микропластиком [60].

Sheehan K.L. и др. (2022) также предположили, что для прохождения пластиковых микроволокон через пищеварительную систему может потребоваться несколько месяцев, поскольку у шести быков наблюдалась схожая частота обнаружения микропластика в фекалиях (50%) даже после прекращения приема минеральных добавок за 5 недель до взятия образцов.

Наконец, Jeyasanta I. и коллеги (2024) проанализировали коммерческие корма для животных, отобранные в трех повторностях из двух регионов Индии, включая восемь образцов корма для птицы и 12 образцов корма для креветок и рыбы [71]. Общая концентрация микропластика в корме для птицы варьировалась от 90 до 330 частиц на кг, преобладающим полимером был PE (33,7%), а

Рис. 2. Источники и пути контаминации мяса и мясных продуктов микропластиком
Fig. 2. Sources and routes of contamination of meat and meat products with microplastics



наиболее распространенным размером частиц был 100–500 мкм. Сканирующая электронная микроскопия выявила признаки выветривания на поверхности микропластика, такие как трещины, хрупкость и неровности.

Из всех рассмотренных исследований, только Jeyasanta I. и др. (2024) указали размер обнаруженных частиц и оценили степень восстановления образцов после разложения, которая составила 90% для PS, PE и PET размером 500 мкм.

Почва

Микропластик часто встречается в почве, что делает ее значимым источником воздействия для сельскохозяйственных животных. Это обусловлено тем, что скот заглатывает почву [72]. Согласно оценкам, крупный рогатый скот ежедневно поглощает от 0,2 до 1,22 кг почвы. Микропластик, возникающий из-за применения обработанных осадков сточных вод (биотвердых веществ), компоста, навоза, сточных вод и полива, накапливается в земле — каждый из этих путей потенциально может содержать высокие концентрации микропластика [73]. Другие возможные факторы включают разложение макропластика, такого как пластиковая мульча, пленка для силоса, шпагат для пресования, удобрения и пестициды с медленным высвобождением и пластиковым покрытием, пластиковые трубы, осадки из атмосферы и ненадлежащее обращение с сельскохозяйственными, бытовыми и производственными отходами [74].

Piehl S. и др. (2018) обнаружили 0,34 частиц микропластика на кг сухой массы почвы, однако анализ имел низкую точность, так как применялся фильтр с размером пор 1 мм [75]. Доминирующим видом пластика был PE (63%), который является основным полимером в пластиковых пленках и способен попадать в организм скота, а затем в почву через навоз. На анализируемом участке в течение последних пяти лет не использовались удобрения, содержащие пластик. Lwanga H.E. и др. (2017) выявили гораздо более высокую плотность микропластика — 870 частиц на кг почвы — в 10 приусадебных участках, но при этом чувствительность оказалась невысокой из-за применения крупного фильтра (2 мм), и не было уточнено, измерялась ли концентрация во влажном или сухом состоянии [64].

Изучение почв в Испании показало еще более высокую концентрацию микропластика в почвах, мульчированных полиэтиленовой пленкой 1–2 раза в год на протяжении 10 лет [76]. В частности, в почве с шести овощных полей было зафиксировано 2116 частиц микропластика на кг сухого веса; хотя размер фильтра и меры по предотвращению загрязнения не были указаны. Yang J. и др. (2021) взяли дубликаты проб земли с полей, которые удобрялись свиным навозом в количестве 1,7 тонн/га в течение предыдущих 22 лет, и обнаружили значительно более низкую концентрацию 43,8 микропластика/кг, несмотря на использование более мелкого фильтра [63]. В отличие от

предыдущих работ, Yang J. и др. (2021) применяли химические реагенты для гомогенизации проб почвы вместо воды, что могло разрушить 0–18,3% PA, PP, PS, PE, PVC, вспененного PS, PA-волокна и PE-пленки на основе результатов теста на восстановление после переваривания. Yu X. и др. (2023) также использовали химические реагенты и фильтр тонкой очистки для выделения микропластика из почвы, была выявлена гораздо более высокая концентрация — 7900 частиц микропластика на кг образцов почвы с птицефабрик одной деревни в Китае [77]. Наконец, Wang Y. и др. (2024) собрали почву с пяти овцеводческих и двух животноводческих ферм и также обнаружили высокую концентрацию микропластика в 3056 частиц \pm 1746 частиц микропластика на кг почвы, большая часть которых приходилась на полиэтилен (20,7%) [78].

В последних трех исследованиях не было уточнено, измерялась ли концентрация во влажном или сухом весе.

Другие источники

Животные, содержащиеся в сельском хозяйстве, регулярно контактируют с водой, воздухом, пластиковыми изделиями и оборудованием, используемыми на фермах, что создает потенциальную угрозу попадания микропластика в их организм. Кроме того, процессы переработки и транспортировки мясной продукции, осуществляемые на бойнях и в других местах, также могут быть источником загрязнения микропластиком. Однако, исследования, посвященные изучению этих потенциальных источников в контексте животноводства и производства мяса, остаются немногочисленными. Вода может быть загрязнена микропластиком, который попадает в нее из почвы или через пластиковые системы водоснабжения [58].

Например, лишь в одном исследовании рассматривалось наличие микропластика в питьевой воде для скота, в другом — в сточных водах, полученных в животноводстве, и ни одно исследование не было посвящено изучению воздуха как пути воздействия на скот. Учитывая обнаружение микропластика в легких свиней, воздействие через дыхательные пути требует особого внимания, т.к. путь попадания микропластика в организм может влиять на его накопление в тканях. Эксперимент, в котором изучались пробы питьевой воды для птиц, выявил наличие 2500 частиц микропластика на килограмм воды [78]. В другом исследовании, анализировавшем сточные воды с нескольких животноводческих ферм, было обнаружено 8–40 частиц микропластика на литр. Сточные воды, хотя и не потребляются скотом напрямую, могут использоваться для орошения почвы, что потенциально приводит к повторному загрязнению [68].

Исследование пластикового оборудования, широко используемого на фермах, показало, что системы водоснабжения изготавливаются из полипропилена, скребки для навоза — из полиэтилена,

трубы — из PVC, а внешние и внутренние слои мешков для кормов — из PP и PE соответственно.

В процессе переработки мяса потенциальными источниками микропластика являются пластиковые разделочные доски, перчатки, фартуки и нарукавники, упаковка для мяса, а также синтетическая одежда и сетки для волос. В рамках одного исследования было установлено, что пластиковые разделочные доски являются источником загрязнения мяса микропластиком, состоящим из PE, на основе анализа полимеров в разделочных досках и образцах мяса [53].

Выводы / Conclusions

Наличие микрочастиц пластика в организмах сельскохозяйственных животных и птицы несет потенциальную угрозу их здоровью, снижает продуктивность и негативно сказывается на восприятии мясной продукции потребителями. Настоящий обзор подтверждает данное утверждение и указывает на существующие пробелы в изучении влияния микропластика на животноводство и птицеводство.

Исследования, посвященные воздействию микропластика на сельскохозяйственных животных и птицу, ограничивались контролируемыми экспериментами, изучающими лишь влияние на структуру тканей, окислительный стресс, воспалительные процессы и апоптоз. Отсутствует понимание взаимосвязи между этими локальными изменениями и общими патологическими последствиями, такими как развитие заболеваний или снижение продуктивности.

Кроме того, недостаточное изучение воздействия на мышечную ткань, включая скорость накопления микропластика, затрудняет экстраполяцию результатов на потребительский опыт и пути распространения микропластика в пищевой цепи человека. В качестве показателя продуктивности

исследовалось только изменение живой массы, и результаты оказались неоднозначными.

Необходимы дальнейшие исследования для оценки влияния этих локальных изменений на экономическую эффективность животноводства и благополучие животных. Понимание этих масштабных последствий необходимо для разработки адекватных мер реагирования на эту новую угрозу.

Эффект воздействия микропластика определяется типом полимера, формой, размером частиц, концентрацией, продолжительностью воздействия и видом животных. Все эти переменные необходимо учитывать при моделировании естественного воздействия.

Существующие исследования в основном сосредоточены на первичном полистироле размером 5 мкм и практически не изучают «состаренный» микропластик, который чаще всего встречается в окружающей среде. Более того, отсутствует единый стандарт для описания различных форм анализируемого микропластика. Это ограничивает обоснование выбранных экспериментальных концентраций и затрудняет оценку их релевантности для реальных производственных систем.

Несмотря на то, что предварительные исследования установили, что корм, почва и вода являются источниками поступления микропластика в организм сельскохозяйственных животных, до сих пор не ясно общее количество и тип микропластика, которому подвергаются животные и птица, и какая его часть фактически потребляется.

Данная информация необходима для определения экспериментальных концентраций, используемых в контролируемых исследованиях, направленных на установление влияния экологически значимого воздействия микропластика на здоровье, продуктивность и безопасность продукции.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Написание текста — Лукин А.А., долевое участия автора — 45% Сбор и обработка материала — Вебер А.Л., долевое участия автора — 45% Редактирование — Исригова Т.А., долевое участия автора — 5% Концепция и дизайн исследования — Жиарно М., долевое участия автора — 5%. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. Text writing — Lukin A.A., author's share — 45% Material collection and processing — Veber A.L., author's share — 45% Editing — Isrigova T.A., author's share — 5% Research concept and design — Ziarno M., author's share — 5%.

The authors declare no conflict of interest

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Rilling M.C., Ingraffia R., de Souza Machado A.A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*. 2017; 8: 1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
- Ranjan V.P., Joseph A., Goel S. Microplastics and other harmful substances released from disposable paper cups into hot water. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 404(B): 124118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124118>
- Mihai F.-C., Gündoğdu S., Khan F.R., Olivelli A., Markley L.A., van Emmerik T. Plastic pollution in marine and freshwater environments: abundance, sources and mitigation. Sarma H., Dominguez D.C., Lee W.-Y. (eds.). *Emerging Contaminants in the Environment. Challenges and Sustainable Practices*. Elsevier. 2022; 241–274. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85160-2.00016-0>
- Liu K., Wang X., Fang T., Xu P., Zhu L., Li D. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of The Total Environment*. 2019; 675: 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>

REFERENCES

- Rilling M.C., Ingraffia R., de Souza Machado A.A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*. 2017; 8: 1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
- Ranjan V.P., Joseph A., Goel S. Microplastics and other harmful substances released from disposable paper cups into hot water. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 404(B): 124118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124118>
- Mihai F.-C., Gündoğdu S., Khan F.R., Olivelli A., Markley L.A., van Emmerik T. Plastic pollution in marine and freshwater environments: abundance, sources and mitigation. Sarma H., Dominguez D.C., Lee W.-Y. (eds.). *Emerging Contaminants in the Environment. Challenges and Sustainable Practices*. Elsevier. 2022; 241–274. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85160-2.00016-0>
- Liu K., Wang X., Fang T., Xu P., Zhu L., Li D. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of The Total Environment*. 2019; 675: 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>

5. Лукин А. Микропластик: реальная угроза. *Животноводство России*. 2025; (9): 19–21. <https://doi.org/10.25701/ZZR.2025.09.001>
6. Luqman A. *et al.* Microplastic Contamination in Human Stools, Foods, and Drinking Water Associated with Indonesian Coastal Population. *Environments*. 2021; 8(12): 138. <https://doi.org/10.3390/environments8120138>
7. Cho Y.M., Choi K.-H. The current status of studies of human exposure assessment of microplastics and their health effects: a rapid systematic review. *Environmental Analysis Health and Toxicology*. 2021; 36(1): e2021004. <https://doi.org/10.5620/eaht.2021004>
8. Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V.F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(4): 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
9. Campanale C. *et al.* Microplastics pollution in the terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants. *Science of The Total Environment*. 2022; 805: 150431. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150431>
10. Лукин А.А. Современные методы определения микропластика в пищевых системах. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2023; (2): 15–21. EDN KINUQL
11. Parfitt J., Stanley C., Thompson A. Guidance for Food and Drink Manufacturers and Retailers on the Use of Food Surplus as Animal Feed. Version 1.0. Banbury: WRAP. 2016; 28.
12. van der Veen I., van Mourik L.M., van Velzen M.J.M., Groenewoud Q.R., Leslie H.A. Plastic Particles in Livestock Feed, Milk, Meat and Blood: A Pilot Study. Report EH22-01. Amsterdam: *Plastic Soup Foundation*. 2022; 48.
13. Schwaferts C., Niessner R., Elsner M., Ivleva N.P. Methods for the analysis of submicrometer- and nanoplastic particles in the environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019; 112: 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.014>
14. Maes T., Jessop R., Wellner N., Haupt K., Mayes A.G. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*. 2017; 7: 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>
15. Shim W.J., Hong S.H., Eo S.E. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical Methods*. 2017; 9(9): 1384–1391. <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>
16. Renzi M., Guerranti C., Blašković A. Microplastic contents from maricultured and natural mussels. *Marine Pollution Bulletin*. 2018; 131(A): 248–251. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.035>
17. Reguera P., Viñas L., Gago J. Microplastics in wild mussels (*Mytilus* spp.) from the north coast of Spain. *Scientia Marina*. 2019; 83(4): 337–347. <https://doi.org/10.3989/scimar.04927.05A>
18. Panebianco A., Nalbone L., Giarratana F., Ziino G. First discoveries of microplastics in terrestrial snails. *Food Control*. 2019; 106: 106722. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106722>
19. Akhbarizadeh R., Moore F., Keshavarzi B. Investigating a probable relationship between microplastics and potentially toxic elements in fish muscles from northeast of Persian Gulf. *Environmental Pollution*. 2018; 232: 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.028>
20. Лукин А.А. Методы идентификации микропластиков в пищевых системах. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 110–126. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-110-126>
21. Li D. *et al.* Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nature Food*. 2020; 1(11): 746–754. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
22. Primpke S. *et al.* Toward the Systematic Identification of Microplastics in the Environment: Evaluation of a New Independent Software Tool (siMPle) for Spectroscopic Analysis. *Applied Spectroscopy*. 2020; 74(9): 1127–1138. <https://doi.org/10.1177/0003702820917760>
23. Tassone S., Barbera S., Kaihara H., Glorio Patrucco S., Abid K. First Evidence of the Effects of Polyethylene Terephthalate Microplastics on Ruminant Degradability and Gastro-Intestinal Digestibility of Mixed Hay. *Animals*. 2024; 14(15): 2139. <https://doi.org/10.3390/ani14152139>
5. Lukin A. Microplastics: real threat. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2025; (9): 19–21 (in Russian). <https://doi.org/10.25701/ZZR.2025.09.001>
6. Luqman A. *et al.* Microplastic Contamination in Human Stools, Foods, and Drinking Water Associated with Indonesian Coastal Population. *Environments*. 2021; 8(12): 138. <https://doi.org/10.3390/environments8120138>
7. Cho Y.M., Choi K.-H. The current status of studies of human exposure assessment of microplastics and their health effects: a rapid systematic review. *Environmental Analysis Health and Toxicology*. 2021; 36(1): e2021004. <https://doi.org/10.5620/eaht.2021004>
8. Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V.F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(4): 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
9. Campanale C. *et al.* Microplastics pollution in the terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants. *Science of The Total Environment*. 2022; 805: 150431. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150431>
10. Lukin A.A. Modern methods for the determination of microplastics in food systems. *Technology and the study of merchandise of innovative foodstuffs*. 2023; (2): 15–21 (in Russian). EDN KINUQL
11. Parfitt J., Stanley C., Thompson A. Guidance for Food and Drink Manufacturers and Retailers on the Use of Food Surplus as Animal Feed. Version 1.0. Banbury: WRAP. 2016; 28.
12. van der Veen I., van Mourik L.M., van Velzen M.J.M., Groenewoud Q.R., Leslie H.A. Plastic Particles in Livestock Feed, Milk, Meat and Blood: A Pilot Study. Report EH22-01. Amsterdam: *Plastic Soup Foundation*. 2022; 48.
13. Schwaferts C., Niessner R., Elsner M., Ivleva N.P. Methods for the analysis of submicrometer- and nanoplastic particles in the environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019; 112: 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.014>
14. Maes T., Jessop R., Wellner N., Haupt K., Mayes A.G. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*. 2017; 7: 44501. <https://doi.org/10.1038/srep44501>
15. Shim W.J., Hong S.H., Eo S.E. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical Methods*. 2017; 9(9): 1384–1391. <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>
16. Renzi M., Guerranti C., Blašković A. Microplastic contents from maricultured and natural mussels. *Marine Pollution Bulletin*. 2018; 131(A): 248–251. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.035>
17. Reguera P., Viñas L., Gago J. Microplastics in wild mussels (*Mytilus* spp.) from the north coast of Spain. *Scientia Marina*. 2019; 83(4): 337–347. <https://doi.org/10.3989/scimar.04927.05A>
18. Panebianco A., Nalbone L., Giarratana F., Ziino G. First discoveries of microplastics in terrestrial snails. *Food Control*. 2019; 106: 106722. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106722>
19. Akhbarizadeh R., Moore F., Keshavarzi B. Investigating a probable relationship between microplastics and potentially toxic elements in fish muscles from northeast of Persian Gulf. *Environmental Pollution*. 2018; 232: 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.028>
20. Lukin A.A. Methods for identifying microplastics in food systems. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 110–126 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-110-126>
21. Li D. *et al.* Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nature Food*. 2020; 1(11): 746–754. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
22. Primpke S. *et al.* Toward the Systematic Identification of Microplastics in the Environment: Evaluation of a New Independent Software Tool (siMPle) for Spectroscopic Analysis. *Applied Spectroscopy*. 2020; 74(9): 1127–1138. <https://doi.org/10.1177/0003702820917760>
23. Tassone S., Barbera S., Kaihara H., Glorio Patrucco S., Abid K. First Evidence of the Effects of Polyethylene Terephthalate Microplastics on Ruminant Degradability and Gastro-Intestinal Digestibility of Mixed Hay. *Animals*. 2024; 14(15): 2139. <https://doi.org/10.3390/ani14152139>

24. Chen J. *et al.* Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of The Total Environment*. 2023; 882: 163305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163305>
25. Na S.W., Guan L.L. Understanding the role of rumen epithelial host-microbe interactions in cattle feed efficiency. *Animal Nutrition*. 2022; 10: 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.04.002>
26. Vinyard J.R., Faciola A.P. Unraveling the pros and cons of various in vitro methodologies for ruminant nutrition: a review. *Translational Animal Science*. 2022; 6(4): txac130. <https://doi.org/10.1093/tas/txac130>
27. Chang X. *et al.* Polystyrene exposure induces lamb gastrointestinal injury, digestive disorders and inflammation, decreasing daily gain, and meat quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024; 277: 116389. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116389>
28. Gałęcka I., Szyryńska N., Całka J. Influence of polyethylene terephthalate (PET) microplastic on selected active substances in the intramural neurons of the porcine duodenum. *Particle and Fibre Toxicology*. 2024; 21: 5. <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00566-w>
29. Zhang Y. *et al.* Polystyrene microplastics-induced cardiotoxicity in chickens via the ROS-driven NF-κB-NLRP3-GSDMD and AMPK-PGC-1α axes. *Science of The Total Environment*. 2022; 840: 156727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156727>
30. Hou L. *et al.* Polystyrene microplastics induce apoptosis in chicken testis via crosstalk between NF-κB and Nrf2 pathways. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2022; 262: 109444. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109444>
31. Li S., Keenan J.I., Shaw I.C., Frizelle F.A. Could Microplastics Be a Driver for Early Onset Colorectal Cancer?. *Cancers*. 2023; 15(13): 3323. <https://doi.org/10.3390/cancers15133323>
32. Eriksen M., Lusher A., Nixon M., Wernery U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments*. 2021; 185: 104374. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>
33. Mahadappa P., Krishnaswamy N., Karunanidhi M., Bhanuprakash A.G., Bindhuja B.V., Dey S. Effect of plastic foreign body impaction on rumen function and heavy metal concentrations in various body fluids and tissues of buffaloes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020; 189: 109972. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109972>
34. Ryan P.G. Effects of ingested plastic on seabird feeding: Evidence from chickens. *Marine Pollution Bulletin*. 1988; 19(3): 125–128. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(88\)90708-4](https://doi.org/10.1016/0025-326x(88)90708-4)
35. Tanaka K., Takada H., Yamashita R., Mizukawa K., Fukuwaka M.-a., Watanuki Y. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Marine Pollution Bulletin*. 2013; 69(1–2): 219–222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.010>
36. Carlin J. *et al.* Microplastic accumulation in the gastrointestinal tracts in birds of prey in central Florida, USA. *Environmental Pollution*. 2020; 264: 114633. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114633>
37. Hornek-Gausterer R *et al.* A preliminary study on the detection of potential contaminants in the European brown hare (*Lepus europaeus*) by suspect and microplastics screening. *Environmental Advances*. 2021; 4: 100045. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100045>
38. Zhao S., Zhu L., Li D. Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers. *Science of The Total Environment*. 2016; 550: 1110–1115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.112>
39. Bahrani F *et al.* Occurrence of microplastics in edible tissues of livestock (cow and sheep). *Environmental Science and Pollution Research*. 2024; 31(14): 22145–22157. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32424-9>
40. Li H. *et al.* Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research*. 2023; 216(2): 114623. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
41. Rbaibi Zipak S., Muratoglu K., Buyukunal S.K. Microplastics in raw milk samples from the Marmara region in Turkey. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*. 2024; 19(2): 175–186. <https://doi.org/10.1007/s00003-023-01477-2>
24. Chen J. *et al.* Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of The Total Environment*. 2023; 882: 163305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163305>
25. Na S.W., Guan L.L. Understanding the role of rumen epithelial host-microbe interactions in cattle feed efficiency. *Animal Nutrition*. 2022; 10: 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.04.002>
26. Vinyard J.R., Faciola A.P. Unraveling the pros and cons of various in vitro methodologies for ruminant nutrition: a review. *Translational Animal Science*. 2022; 6(4): txac130. <https://doi.org/10.1093/tas/txac130>
27. Chang X. *et al.* Polystyrene exposure induces lamb gastrointestinal injury, digestive disorders and inflammation, decreasing daily gain, and meat quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024; 277: 116389. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116389>
28. Gałęcka I., Szyryńska N., Całka J. Influence of polyethylene terephthalate (PET) microplastic on selected active substances in the intramural neurons of the porcine duodenum. *Particle and Fibre Toxicology*. 2024; 21: 5. <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00566-w>
29. Zhang Y. *et al.* Polystyrene microplastics-induced cardiotoxicity in chickens via the ROS-driven NF-κB-NLRP3-GSDMD and AMPK-PGC-1α axes. *Science of The Total Environment*. 2022; 840: 156727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156727>
30. Hou L. *et al.* Polystyrene microplastics induce apoptosis in chicken testis via crosstalk between NF-κB and Nrf2 pathways. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2022; 262: 109444. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109444>
31. Li S., Keenan J.I., Shaw I.C., Frizelle F.A. Could Microplastics Be a Driver for Early Onset Colorectal Cancer?. *Cancers*. 2023; 15(13): 3323. <https://doi.org/10.3390/cancers15133323>
32. Eriksen M., Lusher A., Nixon M., Wernery U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments*. 2021; 185: 104374. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>
33. Mahadappa P., Krishnaswamy N., Karunanidhi M., Bhanuprakash A.G., Bindhuja B.V., Dey S. Effect of plastic foreign body impaction on rumen function and heavy metal concentrations in various body fluids and tissues of buffaloes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020; 189: 109972. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109972>
34. Ryan P.G. Effects of ingested plastic on seabird feeding: Evidence from chickens. *Marine Pollution Bulletin*. 1988; 19(3): 125–128. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(88\)90708-4](https://doi.org/10.1016/0025-326x(88)90708-4)
35. Tanaka K., Takada H., Yamashita R., Mizukawa K., Fukuwaka M.-a., Watanuki Y. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Marine Pollution Bulletin*. 2013; 69(1–2): 219–222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.010>
36. Carlin J. *et al.* Microplastic accumulation in the gastrointestinal tracts in birds of prey in central Florida, USA. *Environmental Pollution*. 2020; 264: 114633. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114633>
37. Hornek-Gausterer R *et al.* A preliminary study on the detection of potential contaminants in the European brown hare (*Lepus europaeus*) by suspect and microplastics screening. *Environmental Advances*. 2021; 4: 100045. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100045>
38. Zhao S., Zhu L., Li D. Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers. *Science of The Total Environment*. 2016; 550: 1110–1115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.112>
39. Bahrani F *et al.* Occurrence of microplastics in edible tissues of livestock (cow and sheep). *Environmental Science and Pollution Research*. 2024; 31(14): 22145–22157. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32424-9>
40. Li H. *et al.* Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research*. 2023; 216(2): 114623. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
41. Rbaibi Zipak S., Muratoglu K., Buyukunal S.K. Microplastics in raw milk samples from the Marmara region in Turkey. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*. 2024; 19(2): 175–186. <https://doi.org/10.1007/s00003-023-01477-2>

42. Meng X. *et al.* Polystyrene microplastics induced oxidative stress, inflammation and necroptosis via NF- κ B and RIP1/RIP3/MLKL pathway in chicken kidney. *Toxicology*. 2022; 478: 153296. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153296>
43. Yin K. *et al.* Polystyrene microplastics up-regulates liver glutamine and glutamate synthesis and promotes autophagy-dependent ferroptosis and apoptosis in the cerebellum through the liver-brain axis. *Environmental Pollution*. 2022; 307: 119449. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119449>
44. Yin K., Wang D., Zhang Y., Lu H., Wang Y., Xing M. Dose-effect of polystyrene microplastics on digestive toxicity in chickens (*Gallus gallus*): Multi-omics reveals critical role of gut-liver axis. *Journal of Advanced Research*. 2023; 52: 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.10.015>
45. Li A. *et al.* Environmental microplastics exposure decreases antioxidant ability, perturbs gut microbial homeostasis and metabolism in chicken. *Science of The Total Environment*. 2023; 856(1): 159089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159089>
46. Zou W. *et al.* Environmental Microplastic Exposure Changes Gut Microbiota in Chickens. *Animals*. 2023; 13(15): 2503. <https://doi.org/10.3390/ani13152503>
47. Malik A. *et al.* Effect of Microplastic Ingestion on Digestive Enzymes, Hormones, Hematology and Serum Biochemistry of *Gallus gallus domesticus*. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*. 2024; 56(6): 1317–1326. <https://doi.org/10.21608/EJVS.2024.276205.1905>
48. Chatman C.C., Olson E.G., Freedman A.J., Dittoe D.K., Ricke S.C., Majumder E.L.-W. Co-exposure to polyethylene fiber and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium alters microbiome and metabolome of *in vitro* chicken cecal mesocosms. *Applied and Environmental Microbiology*. 2024; 90(8): e0091524. <https://doi.org/10.1128/aem.00915-24>
49. Chen Y. *et al.* Co-exposure of polyvinyl chloride microplastics with cadmium promotes nonalcoholic fatty liver disease in female ducks through oxidative stress and glycolipid accumulation. *Poultry Science*. 2024; 103(11): 104152. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104152>
50. Lu H. *et al.* Polystyrene microplastics induce autophagy and apoptosis in birds lungs via PTEN/PI3K/AKT/mTOR. *Environmental Toxicology*. 2023; 38(1): 78–89. <https://doi.org/10.1002/tox.23663>
51. Shelver W.L., McGarvey A.M., Billey L.O., Banerjee A. Fate and disposition of [14 C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of The Total Environment*. 2024; 909: 168512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168512>
52. Wang M. *et al.* The biodistribution of polystyrene nanoparticles administered intravenously in the chicken embryo. *Environment International*. 2024; 188: 108723. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108723>
53. Milne M.H., De Frond H., Rochman C.M., Mallos N.J., Leonard G.H., Baechler B.R. Exposure of U.S. adults to microplastics from commonly-consumed proteins. *Environmental Pollution*. 2024; 343: 123233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123233>
54. Habib R.Z. *et al.* Plastic cutting boards as a source of microplastics in meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2022; 39(3): 609–619. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.2017002>
55. Hua Z.-g., Li L., Na J. Microplastics detected in intestinal tissue of a pig raised near a sludge dump site: a pilot study. *Chinese Journal of Public Health*. 2021; 37(3): 455–460 (на кит. яз.). <https://doi.org/10.11847/zgggws1134513-new>
56. Habib R.Z. *et al.* Microplastic Contamination of Chicken Meat and Fish through Plastic Cutting Boards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(20): 13442. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013442>
57. Kedzierski M., Lechat B., Sire O., Le Maguer G., Le Tilly V., Bruzaud S. Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*. 2020; 24: 100489. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100489>
58. Dong X., Liu X., Hou Q., Wang Z. From natural environment to animal tissues: A review of microplastics(nanoplastics) translocation and hazards studies. *Science of The Total Environment*. 2023; 855: 158686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158686>
59. Sheriff I., Yusoff M.S., Manan T.S.B.A., Koroma M. Microplastics in manure: Sources, analytical methods, toxicodynamic, and toxicokinetic endpoints in livestock and poultry. *Environmental Advances*. 2023; 12: 100372. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100372>
42. Meng X. *et al.* Polystyrene microplastics induced oxidative stress, inflammation and necroptosis via NF- κ B and RIP1/RIP3/MLKL pathway in chicken kidney. *Toxicology*. 2022; 478: 153296. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153296>
43. Yin K. *et al.* Polystyrene microplastics up-regulates liver glutamine and glutamate synthesis and promotes autophagy-dependent ferroptosis and apoptosis in the cerebellum through the liver-brain axis. *Environmental Pollution*. 2022; 307: 119449. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119449>
44. Yin K., Wang D., Zhang Y., Lu H., Wang Y., Xing M. Dose-effect of polystyrene microplastics on digestive toxicity in chickens (*Gallus gallus*): Multi-omics reveals critical role of gut-liver axis. *Journal of Advanced Research*. 2023; 52: 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.10.015>
45. Li A. *et al.* Environmental microplastics exposure decreases antioxidant ability, perturbs gut microbial homeostasis and metabolism in chicken. *Science of The Total Environment*. 2023; 856(1): 159089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159089>
46. Zou W. *et al.* Environmental Microplastic Exposure Changes Gut Microbiota in Chickens. *Animals*. 2023; 13(15): 2503. <https://doi.org/10.3390/ani13152503>
47. Malik A. *et al.* Effect of Microplastic Ingestion on Digestive Enzymes, Hormones, Hematology and Serum Biochemistry of *Gallus gallus domesticus*. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*. 2024; 56(6): 1317–1326. <https://doi.org/10.21608/EJVS.2024.276205.1905>
48. Chatman C.C., Olson E.G., Freedman A.J., Dittoe D.K., Ricke S.C., Majumder E.L.-W. Co-exposure to polyethylene fiber and *Salmonella enterica* serovar Typhimurium alters microbiome and metabolome of *in vitro* chicken cecal mesocosms. *Applied and Environmental Microbiology*. 2024; 90(8): e0091524. <https://doi.org/10.1128/aem.00915-24>
49. Chen Y. *et al.* Co-exposure of polyvinyl chloride microplastics with cadmium promotes nonalcoholic fatty liver disease in female ducks through oxidative stress and glycolipid accumulation. *Poultry Science*. 2024; 103(11): 104152. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104152>
50. Lu H. *et al.* Polystyrene microplastics induce autophagy and apoptosis in birds lungs via PTEN/PI3K/AKT/mTOR. *Environmental Toxicology*. 2023; 38(1): 78–89. <https://doi.org/10.1002/tox.23663>
51. Shelver W.L., McGarvey A.M., Billey L.O., Banerjee A. Fate and disposition of [14 C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of The Total Environment*. 2024; 909: 168512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168512>
52. Wang M. *et al.* The biodistribution of polystyrene nanoparticles administered intravenously in the chicken embryo. *Environment International*. 2024; 188: 108723. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108723>
53. Milne M.H., De Frond H., Rochman C.M., Mallos N.J., Leonard G.H., Baechler B.R. Exposure of U.S. adults to microplastics from commonly-consumed proteins. *Environmental Pollution*. 2024; 343: 123233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123233>
54. Habib R.Z. *et al.* Plastic cutting boards as a source of microplastics in meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2022; 39(3): 609–619. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.2017002>
55. Hua Z.-g., Li L., Na J. Microplastics detected in intestinal tissue of a pig raised near a sludge dump site: a pilot study. *Chinese Journal of Public Health*. 2021; 37(3): 455–460 (in Chinese). <https://doi.org/10.11847/zgggws1134513-new>
56. Habib R.Z. *et al.* Microplastic Contamination of Chicken Meat and Fish through Plastic Cutting Boards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(20): 13442. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013442>
57. Kedzierski M., Lechat B., Sire O., Le Maguer G., Le Tilly V., Bruzaud S. Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*. 2020; 24: 100489. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100489>
58. Dong X., Liu X., Hou Q., Wang Z. From natural environment to animal tissues: A review of microplastics(nanoplastics) translocation and hazards studies. *Science of The Total Environment*. 2023; 855: 158686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158686>
59. Sheriff I., Yusoff M.S., Manan T.S.B.A., Koroma M. Microplastics in manure: Sources, analytical methods, toxicodynamic, and toxicokinetic endpoints in livestock and poultry. *Environmental Advances*. 2023; 12: 100372. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100372>

60. Sheehan K.L., Lawson P., Emerson B. Fate of Plastics in Cattle Digestive Systems. *Journal of Agricultural Safety and Health*. 2022; 28(4): 205–214
<https://doi.org/10.13031/jash.14991>
61. Quartinello F. *et al.* Together Is Better: The Rumen Microbial Community as Biological Toolbox for Degradation of Synthetic Polyesters. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021; 9: 684459.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.684459>
62. Galyon H., Vibostok S., Duncan J., Ferreira G., Whittington A., Cockrum R. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications*. 2022; 4(2): 70–74.
<https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>
63. Yang J. *et al.* Abundance and morphology of microplastics in an agricultural soil following long-term repeated application of pig manure. *Environmental Pollution*. 2021; 272: 116028.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116028>
64. Lwanga H.E. *et al.* Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*. 2017; 7: 14071.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
65. Bilal M. *et al.* First Report on Microplastics Quantification in Poultry Chicken and Potential Human Health Risks in Pakistan. *Toxics*. 2023; 11(7): 612.
<https://doi.org/10.3390/toxics11070612>
66. Leon L.I.D., Bautista I.M.R., Deza A.G.M., Kok J.F.F., Del Mundo E.F., VinceCruz-Abeledo C.C. Microplastic Fragments from Poultry Entrails in Wet Markets from South Caloocan, Philippines. *Research Square*. 2022.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1895151/v1>
67. Susanti R., Yuniastuti A., Fibriana F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2021; 232(5): 178.
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>
68. Wu R.-T., Cai Y.-F., Chen Y.-X., Yang Y.-W., Xing S.-C., Liao X.-D Occurrence of microplastic in livestock and poultry manure in South China. *Environmental Pollution*. 2021; 277: 116790.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116790>
69. Yan Z. *et al.* An efficient method for extracting microplastics from feces of different species. *Journal of Hazardous Materials*. 2020; 384: 121489.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121489>
70. Xu J. *et al.* Wide occurrence of seven phthalate plasticizers and two typical microplastics in pig feed. *Chemosphere*. 2022; 307(2): 135847.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135847>
71. Jeyasanta I., Sathish M.N., Patterson J., Esmeralda V.G., Laju R.L Microplastics contamination in commercial fish meal and feed: a major concern in the cultured organisms. *Chemosphere*. 2024; 363: 142832.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142832>
72. McConnachie S., Clayton E., Arundell L., Dominiak B.C., Brock P. How much soil do cattle ingest? A review. *Animal Production Science*. 2024; 64(15): AN24130.
<https://doi.org/10.1071/AN24130>
73. Ziajahromi S. *et al.* Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems. *Water Research*. 2024; 250: 121071.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121071>
74. Kumar M. *et al.* Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*. 2020; 265(A): 114980.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>
75. Piehl S., Leibner A., Löder M.G.J., Dris R., Bogner C., Laforsch C. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*. 2018; 8: 17950.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y>
76. Beriot N., Peek J., Zornoza R., Geissen V., Lwanga E.H. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment*. 2021; 755(1): 142653.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
77. Yu X. *et al.* Microplastics exacerbate co-occurrence and horizontal transfer of antibiotic resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*. 2023; 451: 131130.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131130>
78. Wang Y., Wang Y., Shao T., Wang R., Dong Z., Xing B. Antibiotics and microplastics in manure and surrounding soil of farms in the Loess Plateau: Occurrence and correlation. *Journal of Hazardous Materials*. 2024; 465: 133434.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133434>
60. Sheehan K.L., Lawson P., Emerson B. Fate of Plastics in Cattle Digestive Systems. *Journal of Agricultural Safety and Health*. 2022; 28(4): 205–214
<https://doi.org/10.13031/jash.14991>
61. Quartinello F. *et al.* Together Is Better: The Rumen Microbial Community as Biological Toolbox for Degradation of Synthetic Polyesters. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021; 9: 684459.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.684459>
62. Galyon H., Vibostok S., Duncan J., Ferreira G., Whittington A., Cockrum R. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications*. 2022; 4(2): 70–74.
<https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>
63. Yang J. *et al.* Abundance and morphology of microplastics in an agricultural soil following long-term repeated application of pig manure. *Environmental Pollution*. 2021; 272: 116028.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116028>
64. Lwanga H.E. *et al.* Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*. 2017; 7: 14071.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
65. Bilal M. *et al.* First Report on Microplastics Quantification in Poultry Chicken and Potential Human Health Risks in Pakistan. *Toxics*. 2023; 11(7): 612.
<https://doi.org/10.3390/toxics11070612>
66. Leon L.I.D., Bautista I.M.R., Deza A.G.M., Kok J.F.F., Del Mundo E.F., VinceCruz-Abeledo C.C. Microplastic Fragments from Poultry Entrails in Wet Markets from South Caloocan, Philippines. *Research Square*. 2022.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1895151/v1>
67. Susanti R., Yuniastuti A., Fibriana F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2021; 232(5): 178.
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>
68. Wu R.-T., Cai Y.-F., Chen Y.-X., Yang Y.-W., Xing S.-C., Liao X.-D Occurrence of microplastic in livestock and poultry manure in South China. *Environmental Pollution*. 2021; 277: 116790.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116790>
69. Yan Z. *et al.* An efficient method for extracting microplastics from feces of different species. *Journal of Hazardous Materials*. 2020; 384: 121489.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121489>
70. Xu J. *et al.* Wide occurrence of seven phthalate plasticizers and two typical microplastics in pig feed. *Chemosphere*. 2022; 307(2): 135847.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135847>
71. Jeyasanta I., Sathish M.N., Patterson J., Esmeralda V.G., Laju R.L Microplastics contamination in commercial fish meal and feed: a major concern in the cultured organisms. *Chemosphere*. 2024; 363: 142832.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142832>
72. McConnachie S., Clayton E., Arundell L., Dominiak B.C., Brock P. How much soil do cattle ingest? A review. *Animal Production Science*. 2024; 64(15): AN24130.
<https://doi.org/10.1071/AN24130>
73. Ziajahromi S. *et al.* Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems. *Water Research*. 2024; 250: 121071.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121071>
74. Kumar M. *et al.* Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*. 2020; 265(A): 114980.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>
75. Piehl S., Leibner A., Löder M.G.J., Dris R., Bogner C., Laforsch C. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*. 2018; 8: 17950.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y>
76. Beriot N., Peek J., Zornoza R., Geissen V., Lwanga E.H. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment*. 2021; 755(1): 142653.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
77. Yu X. *et al.* Microplastics exacerbate co-occurrence and horizontal transfer of antibiotic resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*. 2023; 451: 131130.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131130>
78. Wang Y., Wang Y., Shao T., Wang R., Dong Z., Xing B. Antibiotics and microplastics in manure and surrounding soil of farms in the Loess Plateau: Occurrence and correlation. *Journal of Hazardous Materials*. 2024; 465: 133434.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133434>

ОБ АВТОРАХ

Александр Анатольевич Лукин^{1,2}
кандидат технических наук, доцент
lukin3415@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4753-3210>

Анна Леонидовна Вебер³
доктор технических наук, доцент
Al.veber@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-0715-0426>

Татьяна Александровна Исригова⁴
доктор сельскохозяйственных наук, профессор
isrigova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3528-5830>

Малгожат Жиарно⁵
доктор технических наук, профессор,
Институт пищевых наук,
malgorzata.ziarno@gmail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7445-6375>

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет,
ул. им. Ю.А. Гагарина, 13, Троицк, Челябинская обл.,
457100, Россия

²Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
проспект им. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

³Омский государственный аграрный университет
им. П.А. Столыпина,
Институтская пл., д. 1, Омск, 644008, Россия

⁴Дагестанский государственный аграрный университет
им. М.М. Джамбулатова,
ул. им. Магомета Гаджиева, 180, Махачкала, 367032,
Россия,

⁵Варшавский университет наук о жизни,
ул. Новоурсыновская, 166, Варшава, 02-787, Польша

ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr Anatolyevich Lukin^{1,2}
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
lukin3415@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4753-3210>

Anna Leonidovna Veber³
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Al.veber@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-0715-0426>

Tatyana Alexandrovna Isrigova⁴
Doctor of Agricultural Sciences, Professor
isrigova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3528-5830>

Małgorzata Ziarno⁵
Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of food
sciences,
malgorzata.ziarno@gmail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7445-6375>

¹South Ural State Agrarian University,
13 Gagarin st., Troitsk, Chelyabinsk Region, 457100, Russia

²South Ural State University,
76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

³Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypin,
1 Institutskaya ploshchad, Omsk, 644008, Russia





⁴Dagestan State Agrarian University named
after M.M. Dzhambulatov,
180 Magomet Gadzhiev st., Makhachkala, 367032,
Russia

⁵Warsaw University of Life Sciences,
166 Nowoursynowska st., Warsaw, 02-787, Poland







**Достойное вознаграждение
за привлеченную рекламу
от ИД «Аграрная наука»**

Вы

-  общительны и активны
-  владеете связями в сфере АПК
-  имеете время и желание
-  хотите заработать

Мы гарантируем

-  интересную работу по привлечению
рекламы в проекты ИД
-  свободный, удобный график
-  официальное оформление
-  щедрый % за принесенную вами
рекламу

Звоните +7 (916) 616-05-31

Реклама

УДК 636.087.7:636.5

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-45-54

Н.Р. Касанова¹
 М.К. Гайнуллина¹
 Д.Б. Просвирников²
 Д.В. Тунцев²
 Е.О. Крупин³ ✉
 А.Ш. Салыхов¹
 О.А. Якимов¹
 Е.Е. Головкова¹

¹Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

³Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

✉ evgeny.krupin@gmail.com

Поступила в редакцию: 23.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 28.03.2026

© Касанова Н.Р., Гайнуллина М.К., Просвирников Д.Б., Тунцев Д.В., Крупин Е.О., Салыхов А.Ш., Якимов О.А., Головкова Е.Е.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-45-54

Nadiya R. Kasanova¹
 Munira K. Gainullina¹
 Dmitry B. Prosvirnikov²
 Denis V. Tuntsev²
 Evgeny O. Krupin³ ✉
 Almaz S. Salakhov¹
 Oleg A. Yakimov¹
 Ekaterina E. Golovkova¹

¹Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³Tatar Scientific Research Institute of Agriculture — subdivision of the Federal Research Center «Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Kazan, Russia

✉ evgeny.krupin@gmail.com

Received by the editorial office: 23.12.2025

Accepted in revised: 15.03.2026

Accepted for publication: 28.03.2026

© Kasanova N.R., Gainullina M.K., Prosvirnikov D.B., Tuntsev D.V., Krupin E.O., Salakhov A.S., Yakimov O.A., Golovkova E.E.

Влияние кормовой добавки на основе биомассы дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* на яичную продуктивность перепелов

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Большое влияние на продуктивность сельскохозяйственной птицы оказывает обеспеченность высококачественным протеиновыми кормами и биологически активными веществами. Высокая биологическая активность каротиноидов вызывает интерес и обуславливает поиск эффективных способов их получения и применения. Экспериментальные данные о применении астаксантина в питании теплокровных животных ограничены.

Методы. В рационы перепелов 2, 3 и 4 групп дополнительно вводили кормовую добавку, полученную путем культивирования дрожжей *Rhodospiridium diobovatum*, из расчета 0,4; 0,8 и 1,2 г/кг живой массы соответственно. Отбор проб комбикорма проводили по ГОСТ 13496.0-2016, отбор проб и оценку качества полученных яиц — по ГОСТ 31655-2012. Химический анализ яиц включал определение сухого вещества, сырого протеина, сырого жира, сырой золы, кальция, фосфора с предварительной пробоподготовкой. Оценка яичной продуктивности проводили с начала яйцекладки. Определяли массу яиц, белка, желтка, индексы формы яиц, белка, желтка, единицу ХАУ по общепринятым методикам, содержание каротиноидов в яичном желтке — по ГОСТ Р 54058-2010.

Результаты. Скармливание перепелам-несушкам кормовой добавки, полученной путем культивирования дрожжей *Rhodospiridium diobovatum*, способствовало повышению яйценоскости на 28,9%, 13,9% и 4,8%, интенсивности яйценоскости на 20,8%, 10,0% и 3,5%, улучшению морфологических показателей, инкубационных качеств и пищевой ценности перепелиных яиц, а также содержанию каротиноидов в желтке на 36,4%, 30,9% и 3,6% соответственно. Наилучшие показатели яичной продуктивности были получены у птицы 2 и 3 групп.

Ключевые слова: дрожжи, белок, каротиноиды, астаксантин, перепела, яичная продуктивность, яйца, качество

Для цитирования: Касанова Н.Р. и др. Влияние кормовой добавки на основе биомассы дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* на яичную продуктивность перепелов. *Аграрная наука*. 2026; 405(04): 45–54.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-45-54>

A feed additive based on the yeast biomass of *Rhodospiridium diobovatum* for egg production in quails

ABSTRACT

Relevance. The availability of high-quality protein feed and biologically active substances has a significant impact on the productivity of poultry. The high biological activity of carotenoids is of interest and leads to the search for effective ways to obtain and use them. Experimental data on the use of astaxanthin in the diet of warm-blooded animals are limited.

Methods. A feed additive obtained by cultivating the yeast *Rhodospiridium diobovatum* was additionally introduced into the diets of quails in groups 2, 3 and 4 at the rate of 0,4; 0,8 and 1,2 g/kg of live weight, respectively. Sampling of compound feed was carried out in accordance with GOST 13496.0-2016, sampling and quality assessment of the obtained eggs — in accordance with GOST 31655-2012. The chemical analysis of eggs included the determination of dry matter, crude protein, crude fat, crude ash, calcium, phosphorus with preliminary sample preparation. Egg productivity was assessed from the beginning of oviposition. The weight of eggs, protein, yolk, the shape indices of eggs, protein, yolk, and the HAU unit were determined using generally accepted methods, and the content of carotenoids in egg yolk was determined according to GOST R 54058-2010.

Results. Feeding protein-vitamin feed additives to laying quails obtained by cultivating *Rhodospiridium diobovatum* yeast increased egg production by 28.9%, 13.9% and 4.8%, egg production intensity by 20.8%, 10.0% and 3.5%, improved morphological parameters, incubation qualities and nutritional value of quail eggs, as well as the carotenoid content in the yolk by 36.4%, 30.9% and 3.6%, respectively. The best egg production rates were obtained in birds of groups 2 and 3.

Key words: yeast, protein, carotenoids, astaxanthin, quail, egg production, eggs, quality

For citation: Kasanova N.R. *et al.* The effect of feed additive based on the yeast biomass *Rhodospiridium diobovatum* on egg production of quails. *Agrarian science*. 2026; 405(04): 45–54 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-45-54>

Введение/Introduction

Полноценное сбалансированное кормление птицы является основой современного промышленного птицеводства. Большое влияние на продуктивность сельскохозяйственной птицы оказывает обеспеченность высококачественным протеиновыми кормами, а также биологически активными добавками, в том числе витаминами, минеральными веществами, пробиотиками, адсорбентами и др. Традиционно в комбикормах для сельскохозяйственной птицы в качестве источника протеина используются дорогостоящие кормовые добавки растительного (семена бобовых, жмыхи, шроты, сухая барда, дробина) и животного происхождения (мясокостная и рыбная мука, сухое молоко). Вместе с тем, с экономической точки зрения наиболее перспективно применение в составе комбикормов микробной биомассы, полученной культивированием дрожжей и бактерий, так как для культивирования микроорганизмов применяются отходы перерабатывающих производств, растительные отходы и прочее сырье с низкой себестоимостью. Помимо высококачественного белка и аминокислот микроорганизмы синтезируют ряд биологически активных веществ (витамины, каротиноиды, ферменты, антибиотики и др.), которые участвуют в разнообразных биохимических процессах, обеспечивают антиоксидантную, антиоксидантную и антистрессовую защиту организма [1–3].

Важную физиологическую роль в организме сельскохозяйственной птицы выполняют каротиноиды — это группа природных органических пигментов, продуцируемых бактериями, высшими растениями, водорослями, коралловыми полипами и некоторыми мицелиальными грибами и дрожжами [4–6]. В настоящее время изучена и определена структура более 1150 групп соединений, синтезируемых более 690 видами организмов [7]. По химической природе каротиноиды относятся к терпеноидам, углеводородные цепочки которых состоят из С5-изопреновых единиц изопентилдифосфата и называются С40-изопреноидами [6, 8]. Эти пигменты сгруппированы в каротины и ксантофиллы. Некоторые каротины по своей химической структуре содержат только углерод и водород (например, β -каротин и торулен); ксантофиллы также содержат кислород (например, астаксантин и кантаксантин) [9].

Окраска каротиноидов обусловлена количеством сопряженных двойных связей. К примеру, алифатические полиены с числом сопряженных двойных связей до 5 не имеют окрашивания. К данной группе каротиноидов относятся фитолуен и фитоен, содержащиеся в бананах, яблоках, абрикосах и других фруктах. Такие каротиноиды, как астаксантин и ликопин, имеют по тринадцать и одиннадцать сопряженных двойных связей, что обеспечивает их красный цвет [6, 8].

Животные не способны вырабатывать каротиноиды, но способны усваивать каротиноиды,

поступающие с кормом в организм. Каротиноидные пигменты играют важную роль в защите организма, выполняют функции антиоксидантов, иммуномодуляторов, онкопротекторов и провитаминов, что способствует нормализации физиологического состояния, обменных процессов, репродуктивной функции, улучшают рост и развитие животных и птицы [10].

Каротиноиды благотворно влияют на созревание и активность половых клеток животных, участвуют в поддержании гормонального фона при беременности (входят в состав желтого тела яичника), способствуют нормальному эмбриогенезу, улучшают сохранность поголовья и повышают устойчивость к технологическим стрессам [11].

Большое значение имеют каротиноиды в организме птицы. Желтый окрас желтка яиц обусловлен накоплением каротиноидов [12, 13]. Установлено, что дикие птицы способны накапливать каротиноиды в желтке в 5–10 раз больше, чем птицы, разводимые в промышленных условиях [14–16].

Исследованиями А. Nair (2021) доказано, что использование каротиноидов в рационах кур несушек способствует их переносу в яйцо, что повышает антиоксидантную защиту организма эмбрионов [17]. Включение природных каротиноидов способствует снижению химической нагрузки на ткани организма, что приводит к получению чистой и безопасной продукции птицеводства [18].

Каротиноиды принимают участие в обменных процессах, обладают выраженным иммуномодулирующим действием и поддерживают продуктивное здоровье птиц [19]. Было доказано, что яркая окраска оперения самцов в дикой природе указывает на их здоровье и высокую иммунокомпетентность [20].

В кормлении птицы используют разные виды каротиноидов, в том числе бета-каротин, ликопин, лютеин, астаксантин, кантаксантин и другие. В качестве натуральных источников каротиноидов используют порошок из моркови, перца, тыквы, хлореллы, спирулины, томатов, облепихи, шиповника, брокколи, однако это удорожает рацион. К тому же природные каротиноиды являются нестойкими соединениями. При заготовке и в процессе хранения кормов их содержание и биологическая активность уменьшаются до 30–40%. Поэтому на практике для обогащения рационов каротином в основном используют синтетические препараты, которые лучше используются организмом птиц. Например, по данным Reboul E. (2018) из цельных сырых овощей всасывается в кишечнике примерно 5% каротиноидов, тогда как из мицеллярного раствора — до 50% [21].

Биодоступность каротиноидов зависит также от их структурно-химической и физической формы. Phelan D., Prado-Cabrero A., Nolan J.M. (2018) установлено, что у кур свободный лютеин всасывается намного эффективнее, чем его моно- или диэтиловые эфиры, предварительный гидролиз

этих эфиров повышает всасывание лютеина на 40–60%. То же самое относится к эфирам зеаксантина и капсантина [22]. При этом биодоступность каротиноидов из концентрированных препаратов может сильно варьировать [23], а потребность в них у разных животных является неодинаковой [24].

Значительную долю рынка занимают ведущие мировые компании BASF SE, KeminIndustries, DSM Animal Nutrition, EW Nutrition, VievePharm Animal Nutrition BV и Allied Biotech Corporation, на долю которых приходится более 80% мирового рынка кормовых каротиноидов. Среди российских производителей можно отметить компании «Петрохим», «Эко Ресурс» и «Биокол». Среди кормовых добавок, содержащих астаксантин, используются «Астапет» («ЭкоРесурс»), «Лукантин Розовый» (BASF SE), «Карофилл Розовый» (DSM Nutritional Products), «Эссеншен Пинк» (NHU) и другие [25].

Особый интерес вызывает каротиноид астаксантин как сильный клеточный антиоксидант, который защищает мембраны клеток от разрушения свободными радикалами. Первый органический астаксантин был синтезирован из организма омаров в 1938 году [26]. Данный каротиноид присутствует у большинства водных организмов, а также птиц и растений, имеющих красную окраску. Астаксантин и другие химические производные аста-каротиноиды были обнаружены у ряда видов лишайников в арктической зоне [27].

Каротиноид астаксантин по сравнению с бета-каротином имеет преимущество, два добавочных атома кислорода на каждом шестичленном кольце. Наличие хромофорных групп (сопряженных двойных связей и хиноидных группировок в кольцах) придает астаксантину насыщенный красный цвет. В природе астакаротиноид может находиться не только в свободном виде, но и в форме моно- и диэфира (к примеру, в антарктическом криле составляет 65% в виде диэфира, в водорослях до 70% в виде моноэфира, а в красных дрожжах — 100% в свободной форме) [28].

Биологическая активность каротиноида астаксантина как антиоксиданта в 10 раз выше, чем каротиноида зеаксантина, лютеина, кантаксантина и бета-каротина, и в 100 раз выше альфа-токоферола. Астаксантин способствует устойчивости клеточных мембран, препятствует проникновению через липидный слой веществ, способствующих повышению перекисного окисления липидов в клетках [29], к тому же обеспечивает дополнительную защиту от повреждений, вызываемых свободными радикалами [30, 31].

Установлено, что астаксантин повышает иммунитет, снижает уровень триглицеридов, липопротеинов высокой плотности и гидроперекисей в крови человека [32–34].

В качестве кормовой добавки астаксантин применяют в аквакультуре для пигментации мяса лососевых рыб, а также в целях улучшения качества икры. Экспериментальные данные о применении астаксантина в питании теплокровных животных ограничены. Установлено, что иммуномодулирующие свойства астаксантина проявляет в организме цыплят-бройлеров, однако он не придает окраску мясу и яйцам, так как быстро разрушается в организме.

По данным Б.Р. Остапчук и др. (2019) большой перспективной возможностью является использование кормовых добавок с применением антиоксиданта каротиноида астаксантина для снижения восприимчивости птиц промышленного стада к неблагоприятным факторам окружающей среды, в том числе окислительному стрессу [35].

Исходя из вышеизложенного, целью данного исследования было изучение влияния кормовой добавки с биомассой дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* на яичную продуктивность перепелов, морфологические показатели, химический состав и пищевую ценность полученных яиц.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент по изучению влияния кормовой добавки на яичную продуктивность перепелов был проведен в виварии Казанского государственного аграрного университета (г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация) в зимний период — с декабря 2025 г. по январь 2026 г.

Объект исследований: перепела-несушки породы Фараон (французской линии) в возрасте 40 суток с живой массой 330–339 г.

Для проведения опыта по методу сбалансированных групп с учетом живой массы и возраста было сформировано 4 группы перепелов по 30 голов в каждой группе.¹

Перепела всех групп получали полнорационный комбикорм в соответствии с зоотехническими нормами кормления перепелов². Состав комбикорма: пшеница, ячмень, кукуруза, шрот соевый и подсолнечный, соя полножирная экструдированная, мука мясная, масло подсолнечное, мука известняковая, мука ракушечная, сода пищевая, фосфаты, аминокислоты, органические кислоты, ферментный комплекс, витаминно-минеральный премикс.

Первая контрольная группа перепелов получала комбикорм с добавлением 0,5 г дрожжей кормовых (с содержанием 40% сырого протеина) на спиртовой барде (ПТФ «Татспиртпром», Россия) на 1 кг живой массы. Взамен дрожжей перепела 2 группы получали кормовую добавку, полученную путем культивирования каротинсинтезирующих дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* и бактерий

¹ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях (https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063_rus.pdf)

² Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. 3-е издание переработанное и дополненное. / Под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисинина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. М., 2003. 456 с.

Bacillus subtilis из расчета 0,4 г/кг, перепела 3 группы — 0,8 г/кг и перепела 4 группы — 1,2 г/кг живой массы. Состав добавки: 78,2% сырого протеина, 1,0% каротиноидов (астаксантин).

Содержание птиц было клеточным, в типовых двухрусных клетках с уклоном в соответствии с зоотехническими нормами.

Продолжительность эксперимента составила 65 суток, из которых 5 суток были подготовительным периодом и 60 суток — учетным периодом.

В течение опыта регулярно проводили наблюдения за физиологическим состоянием и сохранностью птицы, поедаемостью комбикорма, консистенцией помета согласно методике ВНИТИП³.

Отбор проб и оценку качества перепелиных яиц проводили одновременно от всех групп в конце учетного периода в соответствии с ГОСТ 31655-2012⁴.

В перепелиных и яйцах и комбикорме определяли содержание сухого вещества⁵ (СВ) в сушильном шкафу СМ 50/250 (Россия), сырого протеина — по методу Кьельдаля на приборе ДК-20, UDK 132 (Россия), сырого жира — на приборе Сокслета (Россия), сырой золы⁶ — сухим озолением, кальция⁷ — объемным методом, фосфора⁸ — на спектрофотометре УВ-1280 (Россия); а также на анализаторе NIRS™DS 2500⁹ (Дания) в соответствии с рекомендациями производителя с предварительной пробоподготовкой, безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ) расчётным методом.

Содержание каротиноидов в яичном желтке определяли по ГОСТ Р 54058-2010¹⁰.

Отбор проб яиц с целью лабораторного контроля их качества и безопасности проводили согласно методическим указаниям по отбору проб пищевой продукции животного и растительного происхождения, кормов, кормовых добавок¹¹ (2009).

Оценку яичной продуктивности перепелов проводили с начала яйцекладки групповым методом. Яйценоскость определяли путем общего подсчета снесенных яиц подопытных групп за учетный период опыта (60 суток) и делением их на среднее поголовье несушек. Яичную продуктивность оценивали по интенсивности яйцекладки, которая выражается в продуктивности птицы в % за определенный отрезок времени.

Массу яиц определяли путем индивидуально взвешивания на электронных весах Adventurer Pro RV3102 (Китай) с точностью до 0,02 г. По размерам измеряли индекс формы яиц¹² (отношение

большого диаметра к малому с точностью до 0,1 мм) в процентах. Индексы белка и желтка (см. там же) определяли по формуле (отношение высоты белка (желтка) к сумме диаметров деленное на 2). Высоту белка (желтка) (см. там же) измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Единицу ХАУ (см. там же) рассчитывали по формуле: отношение высоты белка, вылитого на ровную поверхность, к массе яйца.

Полученные цифровые данные статистически обработаны с помощью компьютерной программы Microsoft Excel с определением критерия достоверности Стьюдента. Достоверность результата считали при $p \leq 0,05$.

Обработку данных провели биометрическими методами, рекомендованными А.Н. Плохинским (Москва, 1970)¹³, используя пакет офисных программ Microsoft Office, Microsoft Excel (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В научной литературе имеются сведения об эффективности применения в качестве кормовой добавки биомассы дрожжей *Rhodotorula spp.*, которые являются одним из основных поставщиков, используемых при биотехнологическом производстве астаксантина и также относятся к семейству *Cryptococcaceae*, к классу *Tremellomycetes*, который входит в тип базидиомицетов (*Basidiomycota*), как и используемый нами *Rhodospiridium diobovatum*. Сообщалось, что они способны накапливать от 93,9 мкг/г сухой массы до 16,9 г/л [36]. В своем составе дрожжевая биомасса содержит помимо астаксантина, также и другие биологически активные компоненты, например, бета-глюканы, аминокислоты и др. El-Banna A.A. *et al.* (2012) установили, что кормовая добавка с клеточной массой *Rhodotorula* безопасна и нетоксична, ее использование в питании кур-несушек также результативно [37]. Другие исследования с применением каротиносодержащих дрожжей рода *Rhodotorula* показали их положительное влияние на иммунную и антиоксидантную функции лабораторных мышей, а также имеют широкую рыночную перспективу и экономически выгодны при применении в качестве пробиотиков [38]. Например, *Rhodotorula benthamica* выделяет астаксантин, который является источником витамина А и удаляет свободные радикалы из организма эффективнее, чем витамин Е [39, 40]. Он способствует повышению потребления корма,

³ Егоров, И. А. Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы, под общ. ред. В.И. Фисинина. Сергиев Посад: ВНИТИП. 2013. С. 51.

⁴ ГОСТ 31655-2012 «Яйца пищевые (индюшковые, цесариные, перепелиные, страусиные). Технические условия

⁵ ГОСТ 31469-2012 Пищевые продукты переработки яиц сельскохозяйственной птицы. Методы физико-химического анализа

⁶ ГОСТ 32933-2014 Корма, комбикорма. Метод определения содержания сырой золы

⁷ ГОСТ 26570-95 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения кальция

⁸ ГОСТ 26657-97 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения содержания фосфора

⁹ <https://foss.su/nirs-ds2500>

¹⁰ ГОСТ Р 54058-2010 – Продукты пищевые функциональные. Метод определения каротиноидов.

¹¹ <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2069019/>

¹² Птицеводство: учебно-методическое пособие к лабораторно-практическим занятиям для обучающихся по направлению 36.03.02

Зоотехния / сост. канд. с.-х. наук, доцент В.Ц. Нимаева. Благовещенск: Изд-во Дальневост. гос. аграр. ун-та, 2019. 167 с.

¹³ Плохинский, А.Н. Биометрия. 2-е изд. М.: МГУ, 1970. 367 с.

среднесуточного прироста массы тела, коэффициента конверсии корма у поросят-сосунов и ягнят на откорме [41–44] за счет содержания в дрожжевой клетке маннан-олигосахарида, который улучшает морфологию тонкого кишечника за счет увеличения количества бокаловидных клеток и высоты ворсинок подвздошной кишки [45]. В других исследованиях S. Orphanee с соавторами (2022) оценивали эффективность красных дрожжей для связывания микотоксина в организме бройлеров. При добавлении красных дрожжей в рацион установлено повышение прироста массы тела и сохранности цыплят ($p \leq 0,05$) [46].

Результаты исследований показали, что перепела всех групп, имели хороший аппетит, внешне выглядели активными, реагировали на раздражители, внешний вид птиц и поведение соответствовало описанию данной породы; помет птиц всех подопытных групп имел характерную окраску и консистенцию, клинических признаков нарушения пищеварения не установлено.

Потребление корма в сутки и за учетный период опыта у птиц всех подопытных групп было одинаковым. Расход корма на 1 кг яичной массы был наименьшим во 2 группе и составил 1,51 кг, что на 23,0% ниже 1 контрольной (1,96 кг). В 3 группе данный показатель находился на уровне 1,72 кг, а в 4 группе был выше, чем в контроле на 12,2% и составил 2,20 кг.

Яйценоскость является одним из основных факторов физиологического состояния и уровня продуктивности сельскохозяйственной птицы (таблица 1). За весь период учета яйценоскость перепелов имела существенные различия. Если в контрольной группе количество снесенных яиц составило 1290 шт., то во 2 группе оно составило 1663 шт., что выше контрольной группы на 28,9% (373 шт.), в 3 группе — на 13,9% (180 шт.), в 4 группе — на 4,8% (62 шт.).

Включение в состав комбикорма изучаемой добавки повысило яйценоскость на среднюю несушку во 2 группе на 27,9%, в 3 группе — на 13,9%, в 4 группе — на 4,6%. Важным критерием является интенсивность яйценоскости за период опыта. Птицы во 2 группе неслись с интенсивностью 92,4%, что является максимальным показателем. В 1 группе данный показатель составил 71,6%, в 3 группе — 81,6%, в 4 группе — 75,1%. Таким образом, увеличение дозы добавки до 1,2 г/кг живой массы перепелов оказывает отрицательное влияние на яйценоскость перепелов.

Морфологические показатели яиц перепелов подопытных групп представлены в таблице 2.

Исследованиями установлено, что по сравнению с контрольной группой средняя масса снесенного яйца у перепелов 2 группы была больше на 1,34%, 3 группы на 0,14%, а 4 группы — достоверно меньше на 14,1% ($p \leq 0,001$).

Масса белка и желтка яиц перепелов в контрольной группе составила 12,01 г, у перепелов 2 и 3 группы была несколько больше, соответственно,

Таблица 1. Яичная продуктивность перепелов (n = 30)

Table 1. Egg productivity of quails (n = 30)

Показатель	Группа			
	1 контрольная	2 опытная	3 опытная	4 опытная
Количество перепелок-несушек в группе, гол.	30	30	30	30
Сохранность, %	100	100	100	100
Период учета яйценоскости, сут.	60	60	60	60
Валовое производство яиц, шт.	1290	1663	1470	1352
Яйценоскость на среднюю несушку, шт/гол.	43	55	49	45
Интенсивность яйценоскости, %	71,6	92,4	81,6	75,1
Яичная масса, кг	0,61	0,79	0,69	0,54
Расход комбикорма на 1 кг яичной массы, кг	1,96	1,51	1,72	2,20

Таблица 2. Морфологические показатели яиц подопытных перепелов (n = 10)

Table 2. Morphological parameters of experimental quail eggs (n = 10)

Показатель	Группа			
	1 контрольная	2 опытная	3 опытная	4 опытная
Масса яйца, г	14,22 ± 0,14	14,41 ± 0,45	14,20 ± 0,11	12,11 ± 0,38***
Масса белка + желтка, г	12,01 ± 0,13	12,25 ± 0,43	12,20 ± 0,02	10,07 ± 0,34***
Индекс формы яиц, %	69,94 ± 4,73	83,73 ± 9,12	70,58 ± 2,76	75,65 ± 2,99
Индекс белка	0,09 ± 0,01	0,17 ± 0,06	0,13 ± 0,00**	0,14 ± 0,01***
Индекс желтка	0,52 ± 0,07	0,53 ± 0,02	0,80 ± 0,29	0,52 ± 0,03
Единица Хау, %	84,5	86,2	82,9	70,9

Примечание: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$

на 2,0% и 1,6%, а у перепелов 4 группы — достоверно меньше на 16,2% ($p \leq 0,001$).

Индексы белка и желтка являются показателями качества и свидетельствуют о свежести яиц. Исследованиями установлено, что индекс белка яйца подопытных перепелов варьировал в пределах от 0,09 до 0,17, индекс желтка — от 0,52 до 0,80, что соответствует нормативу. У птицы 2 и 4 группы индекс белка яиц был достоверно выше контрольных показателей на 44,4% ($p \leq 0,01$) и 55,5% ($p \leq 0,001$).

Показателем качества яйца, который отражает свежесть и плотность белка, является единица Хау. Для инкубационных яиц единица Хау должна составлять не ниже 80. В 1 контрольной группе единица Хау была на уровне 84,5%, при добавлении в комбикорм БВКД во 2 группе данный показатель составил — 86,2%; в 3 группе — 82,9%, в 4 группе — 70,9%.

Химический состав перепелиных яиц, полученных от подопытной птицы, представлен в таблице 3.

Максимальное накопление сухого вещества отмечено в яйцах птиц 2 группы 30,20%, что на 1,6%

Таблица 3. Химический состав перепелиных яиц (n = 12), в сухом веществе

Table 3. Chemical composition of quail eggs (n = 12), in dry matter

Показатель	Группа							
	1 контрольная		2 опытная		3 опытная		4 опытная	
	%	г	%	г	%	г	%	г
Сырой протеин	48,80 ± 0,74	13,90 ± 0,26	48,70 ± 0,15	14,50 ± 0,25	50,17 ± 1,48	14,37 ± 0,47	50,70 ± 0,46***	14,10 ± 0,17
Сырой жир	40,90 ± 0,81	11,63 ± 0,37	43,13 ± 0,50	13,00 ± 0,50	43,80 ± 0,47*	12,57 ± 0,18	43,10 ± 1,16	12,00 ± 0,56
Сырая зола	3,56 ± 0,06	1,02 ± 0,02	3,50 ± 0,44	1,05 ± 0,12	3,53 ± 0,29	1,01 ± 0,08	3,94 ± 0,09	1,09 ± 0,02
Сырые БЭВ	6,83 ± 1,18	1,94 ± 0,32	5,14 ± 0,75	1,55 ± 0,26	3,04 ± 1,52	0,87 ± 0,44	2,34 ± 0,66**	0,64 ± 0,17
Кальций, %	0,80 ± 0,03		0,90 ± 0,20		0,75 ± 0,04		1,33 ± 0,17**	
Фосфор, %	0,13 ± 0,05		0,09 ± 0,03		0,14 ± 0,03		0,08 ± 0,01	

Примечание: *p ≤ 0,05; **p ≤ 0,01; ***p ≤ 0,001

больше контроля. В яйцах перепелов 3 и 4 групп этот показатель был на уровне контроля в пределах 27,97–28,77%. Содержание сырого протеина в яйцах перепелов 3 и 4 групп было выше, чем в 1 группе на 1,37% и 1,90% соответственно. Разница между 1 и 4 группой достоверна (p ≤ 0,001). Следует отметить тенденцию к повышению в яйцах несушек, получавших белково-витаминную кормовую добавку, содержания сырого жира в среднем на 2,44%. Содержание БЭВ в яйцах перепелов 2 группы снизилось по сравнению с контролем на 1,69% и составило 5,14 ± 0,75%, а в яйцах несушек 3 и 4 групп составило — 3,04 ± 1,52% и 2,34 ± 0,66% (p ≤ 0,01), соответственно. Наибольшее содержание кальция в сухом веществе 0,90% и 1,33% отмечено в яйцах перепелов 2 и 4 группы, что выше контроля на 0,10%, и 0,53% (p ≤ 0,01). Содержание фосфора в яйцах перепелов во всех опытных группах находилось примерно на одном уровне.

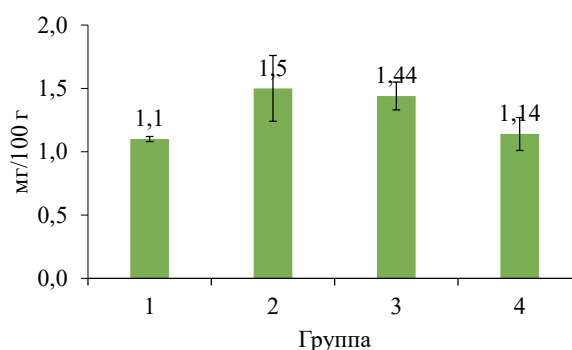
Важным показателем является содержание в яйцах каротиноидов, которые влияют на их биологическую ценность и инкубационные качества. Результаты анализов показали, что содержание каротиноидов в составе желтка яиц подопытной птицы коррелировало с дозами астаксантина (рис. 1). По нашим данным, содержание каротиноидов в яйцах перепелов 2 группы составило 1,50 ± 0,26 мг/100 г, 3 группы — 1,44 ± 0,11 мг/100 г (p ≤ 0,01), 4 группы — 1,14 ± 0,13 мг/100 г, что больше контрольных значений на 36,4%, 30,9% и 3,6% соответственно.

Повышение в составе яиц сырого жира способствовало увеличению их калорийности. Энергетическая питательность яиц перепелов 2 группы составила 186,67 ± 6,17 ккал в 100 г, что является максимальным значением. Менее калорийными оказались яйца птиц 1 и 4 группы — 173,67 ± 3,38 и 172,68 ± 4,91 ккал/100 г.

Таким образом, анализ литературных данных и выполненные исследования свидетельствуют о высокой биологической активности каротиноидов

Рис. 1. Содержание каротиноидов в перепелиных яйцах в конце учетного периода, мг/100 г (n = 12)

Fig. 1. Carotenoid content in quail eggs at the end of the reference period, mg/100 g (n = 12)



и большом интересе ученых-исследователей. Возникает необходимость, обуславливающая поиск эффективных способов их получения и применения в медицине и ветеринарии [47, 48]. Особенно актуален данный вопрос в регионах с высоко развитым птицеводством, где наиболее предпочтительным видится алиментарный путь их применения в составе различных кормовых концентратов и иных балансирующих добавок для животных [49, 50].

Выводы/Conclusions

Проведенные исследования показали, что скармливание перепелам-несушкам различных доз кормовой добавки, полученной путем культивирования дрожжей *Rhodospiridium diobovatum*, не оказало отрицательного влияния на поедаемость комбикорма, способствовало повышению яйценоскости на 28,9%, 13,9% и 4,8%, интенсивности яйценоскости на 20,8%, 10,0% и 3,5%, улучшению морфологических показателей, инкубационных качеств и пищевой ценности перепелиных яиц, а также содержанию каротиноидов в желтке на 36,4%, 30,9% и 3,6%. Наилучшие показатели яичной продуктивности были получены у птицы 2 и 3 групп, получавших кормовую добавку из расчета 0,4 г/кг и 0,8 г/кг соответственно.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение №2 от 01.12.2025 г).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрианова Е.Н. Егоров И.А., Григорьева Е.Н., Шевяков А.Н., Пронин В.В. Люпин в кормлении кур-несушек родительского стада. *Сельскохозяйственная биология*. 2019; 54(2): 326–336. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.2.326rus>
2. Волкова С.В., Белокурова Е.С., Рубанов Д.А. Дрожжи рода *Rhodotorula* — перспективный источник каротиноидов для кормопроизводства. Пищевая индустрия в современных условиях: тренды и инновации. *Сборник научных статей Международной научно-практической конференции*. Орел: ОрелГАУ. 2023; 2: 298–302. EDN FSTSFx
3. Мифтахутдинов А.В., Диктярук И.Н. Влияние антистрессового фармакологического комплекса «СПАО» на эффективность профилактической иммунизации кур против болезни Ньюкасла. *Аграрная наука*. 2020; (3): 13–16. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-13-16>
4. Pagels F., Vasconcelos V., Guedes A.C. Carotenoids from Cyanobacteria: Biotechnological Potential and Optimization Strategies. *Biomolecules*. 2021; 11(5): 735. <https://doi.org/10.3390/biom11050735>
5. Maoka T. Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines*. 2020; 74(1): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x>
6. Ashokkumar V. et al. Technological advances in the production of carotenoids and their applications — A critical review. *Bioresource Technology*. 2023; 367: 128215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128215>
7. Foong L.C., Loh C.W.L., Ng H.S., Lan J.C.-W. Recent development in the production strategies of microbial carotenoids. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37(1): 12. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02967-3>
8. Novoveská L., Ross M.E., Stanley M.S., Pradelles R., Wasiolek V., Sassi J.-F. Microalgal Carotenoids: A Review of Production, Current Markets, Regulations, and Future Direction. *Marine Drugs*. 2019; 17(11): 640. <https://doi.org/10.3390/md17110640>
9. Bhosale P., Jogdand V.V., Gadre R.V. Stability of β -carotene in spray dried preparation of *Rhodotorula glutinis* mutant 32. *Journal of Applied Microbiology*. 2003; 95(3): 584–590. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02018.x>
10. Колпакова В.В. и др. Использование экологически безопасного микроорганизма рода *Rhodotorula* для получения кормового каротинсодержащего концентрата. *Юг России: экология, развитие*. 2022; 17(4): 61–78. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-4-61-78>
11. Shashikala K.B., Hemalatha B.N., Pooja S., Patil S.J. Nutraceutical Antioxidants and Their Influence on Reproduction. Keservani R.K., Patil S.J., Aranha I. (eds.). *Nutraceuticals for the Treatment and Prevention of Sexual Disorders*. Apple Academic Press. 2025; 399–421. <https://doi.org/10.1201/9781003503774-21>
12. Surai P.F., Speake B.K., Sparks N.H.C. Carotenoids in Avian Nutrition and Embryonic Development. 1. Absorption, Availability and Levels in Plasma and Egg Yolk. *The Journal of Poultry Science*. 2001; 38(1): 1–27. <https://doi.org/10.2141/jpsa.38.1>
13. Surai P.F., Speake B.K., Sparks N.H.C. Carotenoids in Avian Nutrition and Embryonic Development. 2. Antioxidant Properties and Discrimination in Embryonic Tissues. *The Journal of Poultry Science*. 2001; 38(2): 117–145. <https://doi.org/10.2141/jpsa.38.117>
14. Surai P.F., Bortolotti G.R., Fidgett A.L., Blount J.D., Speake B.K. Effects of piscivory on the fatty acid profiles and antioxidants of avian yolk: studies on eggs of the gannet, skua, pelican and cormorant. *Journal of Zoology*. 2001; 255(3): 305–312. <https://doi.org/10.1017/S0952836901001406>
15. Garamszegi L.Z., Biard C., Eens M., Møller A.P., Saino N., Surai P. Maternal effects and the evolution of brain size in birds: Overlooked developmental constraints. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2007; 31(4): 498–515. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.11.008>
16. Surai P.F. *Natural Antioxidants in Avian Nutrition and Reproduction*. Nottingham: Nottingham University Press. 2002; xvi, 615. ISBN 1-897676-95-6

FUNDING

The research was carried out at the expense of a grant provided in 2025 by the Foundation for Science and Technology of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and exploratory research in scientific and educational organizations, enterprises and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan (agreement No. 2 dated 01.12.2025).

REFERENCES

1. Andrianova E.N. Egorov I.A., Grigoryeva E.N., Shevyakov A.N., Pronin V.V. Lupine is applicable in diets for layer chicken of parental flock. *Agricultural Biology*. 2019; 54(2): 326–336 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.2.326eng>
2. Volkova S.V., Belokurova E.S., Rubanov D.A. Genus *Rhodotorula* is a promising source of carotenoids for fodder production. *The food industry in modern conditions: trends and innovations. Collection of scientific articles of the International scientific and practical conference*. Orel: Orel State Agrarian University. 2023; 2: 298–302 (in Russian). EDN FSTSFx
3. Miftakhutdinov A.V., Dikhtyaruk I.N. The influence of the anti-stress pharmacological complex “SPA0” on the effectiveness of preventive immunization of chickens against Newcastle disease. *Agrarian science*. 2020; (3): 13–16 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-336-3-13-16>
4. Pagels F., Vasconcelos V., Guedes A.C. Carotenoids from Cyanobacteria: Biotechnological Potential and Optimization Strategies. *Biomolecules*. 2021; 11(5): 735. <https://doi.org/10.3390/biom11050735>
5. Maoka T. Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines*. 2020; 74(1): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x>
6. Ashokkumar V. et al. Technological advances in the production of carotenoids and their applications — A critical review. *Bioresource Technology*. 2023; 367: 128215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128215>
7. Foong L.C., Loh C.W.L., Ng H.S., Lan J.C.-W. Recent development in the production strategies of microbial carotenoids. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37(1): 12. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02967-3>
8. Novoveská L., Ross M.E., Stanley M.S., Pradelles R., Wasiolek V., Sassi J.-F. Microalgal Carotenoids: A Review of Production, Current Markets, Regulations, and Future Direction. *Marine Drugs*. 2019; 17(11): 640. <https://doi.org/10.3390/md17110640>
9. Bhosale P., Jogdand V.V., Gadre R.V. Stability of β -carotene in spray dried preparation of *Rhodotorula glutinis* mutant 32. *Journal of Applied Microbiology*. 2003; 95(3): 584–590. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02018.x>
10. Kolpakova V.V. et al. Use of environmentally safe micromycetes of the genus *Rhodotorula* to obtain fodder carotene-containing concentrate. *South of Russia: ecology, development*. 2022; 17(4): 61–78 (in Russian). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-4-61-78>
11. Shashikala K.B., Hemalatha B.N., Pooja S., Patil S.J. Nutraceutical Antioxidants and Their Influence on Reproduction. Keservani R.K., Patil S.J., Aranha I. (eds.). *Nutraceuticals for the Treatment and Prevention of Sexual Disorders*. Apple Academic Press. 2025; 399–421. <https://doi.org/10.1201/9781003503774-21>
12. Surai P.F., Speake B.K., Sparks N.H.C. Carotenoids in Avian Nutrition and Embryonic Development. 1. Absorption, Availability and Levels in Plasma and Egg Yolk. *The Journal of Poultry Science*. 2001; 38(1): 1–27. <https://doi.org/10.2141/jpsa.38.1>
13. Surai P.F., Speake B.K., Sparks N.H.C. Carotenoids in Avian Nutrition and Embryonic Development. 2. Antioxidant Properties and Discrimination in Embryonic Tissues. *The Journal of Poultry Science*. 2001; 38(2): 117–145. <https://doi.org/10.2141/jpsa.38.117>
14. Surai P.F., Bortolotti G.R., Fidgett A.L., Blount J.D., Speake B.K. Effects of piscivory on the fatty acid profiles and antioxidants of avian yolk: studies on eggs of the gannet, skua, pelican and cormorant. *Journal of Zoology*. 2001; 255(3): 305–312. <https://doi.org/10.1017/S0952836901001406>
15. Garamszegi L.Z., Biard C., Eens M., Møller A.P., Saino N., Surai P. Maternal effects and the evolution of brain size in birds: Overlooked developmental constraints. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2007; 31(4): 498–515. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.11.008>
16. Surai P.F. *Natural Antioxidants in Avian Nutrition and Reproduction*. Nottingham: Nottingham University Press. 2002; xvi, 615. ISBN 1-897676-95-6

17. Nair A. *et al.* Astaxanthin as a King of Ketocarotenoids: Structure, Synthesis, Accumulation, Bioavailability and Antioxidant Properties. *Marine Drugs*. 2023; 21(3): 176. <https://doi.org/10.3390/md21030176>
18. Колдаев В.М., Кропотов А.В. Каротиноиды в практической медицине. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2022; (1): 65–71. <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2022-1-65-71>
19. Møller A.P. *et al.* Carotenoid-dependent Signals: Indicators of Foraging Efficiency, Immunocompetence or Detoxification Ability?. *Avian and Poultry Biology Reviews*. 2000; 11(3): 137–159.
20. Blount J.D., Metcalfe N.B., Birkhead T.R., Surai P.F. Carotenoid Modulation of Immune Function and Sexual Attractiveness in Zebra Finches. *Science*. 2003; 300(5616): 125–127. <https://doi.org/10.1126/science.1082142>
21. Reboul E. Mechanisms of Carotenoid Intestinal Absorption: Where Do We Stand?. *Nutrients*. 2019; 11(4): 838. <https://doi.org/10.3390/nu11040838>
22. Phelan D., Prado-Cabrero A., Nolan J.M. Analysis of Lutein, Zeaxanthin, and Meso-Zeaxanthin in the Organs of Carotenoid-Supplemented Chickens. *Foods*. 2018; 7(2): 20. <https://doi.org/10.3390/foods7020020>
23. Ren T., Xu M., Lin W., Luo W., Zhang X. Transcriptome sequencing reveals the potential mechanisms of dietary lutein regulation on chicken leg muscle development. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104265>
24. Liao Y. *et al.* Metabolism, Function, Molecular Mechanism, and Application of Carotenoids in Coloration of Aquatic Animals. *Reviews in Aquaculture*. 2025; 17(2): e70016. <https://doi.org/10.1111/raq.70016>
25. Николаевич Л.Н., Згировская А.А., Борисовец Д.С. Биологические свойства каротиноидов и их применение в рационе питания сельскохозяйственных животных (обзор). *Эпизоотология, иммунология, фармакология, санитария*. 2023; (1): 53–59. EDN NFJGKO
26. Chang J.-H., Chen Y., Holland D., Grabowski J. Estimating spatial distribution of American lobster *Homarus americanus* using habitat variables. *Marine Ecology Progress Series*. 2010; 420: 145–156. <https://doi.org/10.3354/meps08849>
27. Ambati R.R., Phang S.-M., Ravi S., Aswathanarayana R.G. Astaxanthin: Sources, Extraction, Stability, Biological Activities and Its Commercial Applications—A Review. *Marine Drugs*. 2014; 12(1): 128–152. <https://doi.org/10.3390/md12010128>
28. European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the Scientific Panel on additives and products or substances used in animal feed (FEEDAP) on the safety of use of colouring agents in animal nutrition — PART I. General Principles and Astaxanthin. *EFSA Journal*. 2005; 3(12): 291. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2005.291>
29. Rizzardi N. *et al.* Natural Astaxanthin Is a Green Antioxidant Able to Counteract Lipid Peroxidation and Ferroptotic Cell Death. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(23): 15137. <https://doi.org/10.3390/ijms232315137>
30. Edge R., Gaikwad P., Navaratnam S., Rao B.S.M., Truscott G.T. Reduction of oxidized guanosine by dietary carotenoids: A pulse radiolysis study. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2010; 504(1): 100–103. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.07.026>
31. Abdol Wahab N.R., Meor Mohd Affandi M.M.R., Fakurazi S., Alias E., Hassan H. Nanocarrier System: State-of-the-Art in Oral Delivery of Astaxanthin. *Antioxidants*. 2022; 11(9): 1676. <https://doi.org/10.3390/antiox11091676>
32. Ciaraldi T.P., Boeder S.C., Mudaliar S.R., Giovannetti E.R., Henry R.R., Pettus J.H. Astaxanthin, a natural antioxidant, lowers cholesterol and markers of cardiovascular risk in individuals with prediabetes and dyslipidaemia. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2023; 25(7): 1985–1994. <https://doi.org/10.1111/dom.15070>
33. Eldessouki E.A.A. *et al.* Influence of astaxanthin-enriched *Haematococcus pluvialis* microalgae on the growth efficacy, immune response, antioxidant capacity, proinflammatory cytokines, and tissue histomorphology of hybrid red tilapia. *Aquaculture International*. 2024; 32(6): 7447–7468. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01524-1>
34. Nakagawa K. *et al.* Antioxidant effect of astaxanthin on phospholipid peroxidation in human erythrocytes. *British Journal of Nutrition*. 2011; 105(11): 1563–1571. <https://doi.org/10.1017/S0007114510005398>
17. Nair A. *et al.* Astaxanthin as a King of Ketocarotenoids: Structure, Synthesis, Accumulation, Bioavailability and Antioxidant Properties. *Marine Drugs*. 2023; 21(3): 176. <https://doi.org/10.3390/md21030176>
18. Koldaev V.M., Kropotov A.V. Carotenoids in practical medicine. *Pacific Medical Journal*. 2022; (1): 65–71 (in Russian). <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2022-1-65-71>
19. Møller A.P. *et al.* Carotenoid-dependent Signals: Indicators of Foraging Efficiency, Immunocompetence or Detoxification Ability?. *Avian and Poultry Biology Reviews*. 2000; 11(3): 137–159.
20. Blount J.D., Metcalfe N.B., Birkhead T.R., Surai P.F. Carotenoid Modulation of Immune Function and Sexual Attractiveness in Zebra Finches. *Science*. 2003; 300(5616): 125–127. <https://doi.org/10.1126/science.1082142>
21. Reboul E. Mechanisms of Carotenoid Intestinal Absorption: Where Do We Stand?. *Nutrients*. 2019; 11(4): 838. <https://doi.org/10.3390/nu11040838>
22. Phelan D., Prado-Cabrero A., Nolan J.M. Analysis of Lutein, Zeaxanthin, and Meso-Zeaxanthin in the Organs of Carotenoid-Supplemented Chickens. *Foods*. 2018; 7(2): 20. <https://doi.org/10.3390/foods7020020>
23. Ren T., Xu M., Lin W., Luo W., Zhang X. Transcriptome sequencing reveals the potential mechanisms of dietary lutein regulation on chicken leg muscle development. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104265>
24. Liao Y. *et al.* Metabolism, Function, Molecular Mechanism, and Application of Carotenoids in Coloration of Aquatic Animals. *Reviews in Aquaculture*. 2025; 17(2): e70016. <https://doi.org/10.1111/raq.70016>
25. Nikolaevich L.N., Zgirovskaya A.A., Borisovets D.S. Biological properties of carotenoids and their application in the diet of farm animals (review). *Epizootology, Immunobiology, Pharmacology, Sanitation*. 2023; (1): 53–59 (in Russian). EDN NFJGKO
26. Chang J.-H., Chen Y., Holland D., Grabowski J. Estimating spatial distribution of American lobster *Homarus americanus* using habitat variables. *Marine Ecology Progress Series*. 2010; 420: 145–156. <https://doi.org/10.3354/meps08849>
27. Ambati R.R., Phang S.-M., Ravi S., Aswathanarayana R.G. Astaxanthin: Sources, Extraction, Stability, Biological Activities and Its Commercial Applications—A Review. *Marine Drugs*. 2014; 12(1): 128–152. <https://doi.org/10.3390/md12010128>
28. European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the Scientific Panel on additives and products or substances used in animal feed (FEEDAP) on the safety of use of colouring agents in animal nutrition — PART I. General Principles and Astaxanthin. *EFSA Journal*. 2005; 3(12): 291. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2005.291>
29. Rizzardi N. *et al.* Natural Astaxanthin Is a Green Antioxidant Able to Counteract Lipid Peroxidation and Ferroptotic Cell Death. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(23): 15137. <https://doi.org/10.3390/ijms232315137>
30. Edge R., Gaikwad P., Navaratnam S., Rao B.S.M., Truscott G.T. Reduction of oxidized guanosine by dietary carotenoids: A pulse radiolysis study. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2010; 504(1): 100–103. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.07.026>
31. Abdol Wahab N.R., Meor Mohd Affandi M.M.R., Fakurazi S., Alias E., Hassan H. Nanocarrier System: State-of-the-Art in Oral Delivery of Astaxanthin. *Antioxidants*. 2022; 11(9): 1676. <https://doi.org/10.3390/antiox11091676>
32. Ciaraldi T.P., Boeder S.C., Mudaliar S.R., Giovannetti E.R., Henry R.R., Pettus J.H. Astaxanthin, a natural antioxidant, lowers cholesterol and markers of cardiovascular risk in individuals with prediabetes and dyslipidaemia. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2023; 25(7): 1985–1994. <https://doi.org/10.1111/dom.15070>
33. Eldessouki E.A.A. *et al.* Influence of astaxanthin-enriched *Haematococcus pluvialis* microalgae on the growth efficacy, immune response, antioxidant capacity, proinflammatory cytokines, and tissue histomorphology of hybrid red tilapia. *Aquaculture International*. 2024; 32(6): 7447–7468. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01524-1>
34. Nakagawa K. *et al.* Antioxidant effect of astaxanthin on phospholipid peroxidation in human erythrocytes. *British Journal of Nutrition*. 2011; 105(11): 1563–1571. <https://doi.org/10.1017/S0007114510005398>

35. Остапчук П.С., Зубоченко Д.В., Кувейда Т.А. Роль антиоксидантов и использование их в животноводстве и птицеводстве (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019; 20(2): 103–117. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.103-117>
36. Довыденкова М.В., Колодина Е.Н., Никанова Д.А., Логвинова Т.И., Артемьева О.А. Эффективность использования каротинсинтезирующих дрожжей *Rhodotorula* spp. в кормлении сельскохозяйственных животных. *Животноводство и кормопроизводство*. 2024; 107(2): 149–169. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-2-149>
37. El-Banna A., El-Razek A., El-Mahdy A. Some Factors Affecting the Production of Carotenoids by *Rhodotorula glutinis* var. *Glutinis*. *Food and Nutrition Sciences*. 2012; 3(1): 64–71. <https://doi.org/10.4236/fns.2012.31011>
38. Ge Y., Huang K., Xie W., Xu C., Yao Q., Liu Y. Effects of *Rhodotorula mucilaginosa* on the Immune Function and Gut Microbiota of Mice. *Frontiers in Fungal Biology*. 2021; 2: 705696. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2021.705696>
39. Elwan H.A.M., Elnesr S.S., Abdallah Y., Hamdy A., El-Bogdady A.H. Red yeast (*Phaffia rhodozyma*) as a source of Astaxanthin and its impacts on productive performance and physiological responses of poultry. *World's Poultry Science Journal*. 2019; 75(2): 273–284. <https://doi.org/10.1017/S0043933919000187>
40. Wang L., Xie J., Wu W., Li B., Ou J. Excellent microbial cultivation for astaxanthin production and its extraction by *Rhodotorula benthica*. *Med. Res.* 2018; 2(4): 180015. <https://doi.org/10.21127/yaoyimr20180015>
41. Dávila-Ramírez J.L. et al. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, blood metabolites, carcass traits, quality, and sensorial traits of meat from pigs under heat stress. *Animal Feed Science and Technology*. 2020; 267: 114573. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2020.114573>
42. Haddad S.G., Goussous S.N. Effect of yeast culture supplementation on nutrient intake, digestibility and growth performance of Awassi lambs. *Animal Feed Science and Technology*. 2005; 118(3–4): 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2004.10.003>
43. Lei Y., Kim I.H. Effect of *Phaffia rhodozyma* on performance, nutrient digestibility, blood characteristics, and meat quality in finishing pigs. *Journal of Animal Science*. 2014; 92(1): 171–176. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6749>
44. Song B. et al. Dietary Supplementation of Yeast Culture Into Pelleted Total Mixed Rations Improves the Growth Performance of Fattening Lambs. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 657816. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.657816>
45. Ayiku S., Shen J.-f., Tan B.-p., Dong X.-h., Liu H.-y. Effects of dietary yeast culture on shrimp growth, immune response, intestinal health and disease resistance against *Vibrio harveyi*. *Fish & Shellfish Immunology*. 2020; 102: 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.04.036>
46. Srinual O. et al. Can Red Yeast (*Sporidiobolus pararoseus*) Be Used as a Novel Feed Additive for Mycotoxin Binders in Broiler Chickens?. *Toxins*. 2022; 14(10): 678. <https://doi.org/10.3390/toxins14100678>
47. Ядерев В.В., Карпова Н.В., Глаголева Е.В., Петрова К.С., Шибяева А.С., Джавахия В.В. Каротиноиды: обзор основных биотехнологических способов и условий получения. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2024; 14(1): 41–54. <https://doi.org/10.21285/achb.905>
48. Ozdemirov A.A., Krupin E.O. Регионально ориентированные стратегии повышения эффективности мясного и молочного животноводства в России: опыт Дагестана и Татарстана (2011–2022 гг.). *Аграрный вестник Северного Кавказа*. 2025; 15(3): 37–52. <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-3-35-50>
49. Krupin E.O., Shakirov S.K., Tagirov M.Sh. О некоторых результатах использования нового кормового концентрата в рационах дойных коров. *Молочное и мясное скотоводство*. 2017; (6): 22–25. EDN ZSIEQN
50. Теребова С.В., Никулин Ю.П., Никулина О.А., Черепанова Е.К. Использование кормовой добавки «Левибю» при выращивании молодяка овец. *Аграрная наука*. 2025; (7): 62–70. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-62-70>
35. Ostopchuk P.S., Zubochenko D.V., Kuevda T.A. The role of antioxidants and their use in animal breeding and poultry farming (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019; 20(2): 103–117 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.103-117>
36. Dovydenkova M.V., Kolodina E.N., Nikanova D.A., Logvinova T.I., Artemieva O.A. The effectiveness of using carotene-synthesizing yeast *Rhodotorula* spp. in feeding farm animals (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024; 107(2): 149–169 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-2-149>
37. El-Banna A., El-Razek A., El-Mahdy A. Some Factors Affecting the Production of Carotenoids by *Rhodotorula glutinis* var. *Glutinis*. *Food and Nutrition Sciences*. 2012; 3(1): 64–71. <https://doi.org/10.4236/fns.2012.31011>
38. Ge Y., Huang K., Xie W., Xu C., Yao Q., Liu Y. Effects of *Rhodotorula mucilaginosa* on the Immune Function and Gut Microbiota of Mice. *Frontiers in Fungal Biology*. 2021; 2: 705696. <https://doi.org/10.3389/ffunb.2021.705696>
39. Elwan H.A.M., Elnesr S.S., Abdallah Y., Hamdy A., El-Bogdady A.H. Red yeast (*Phaffia rhodozyma*) as a source of Astaxanthin and its impacts on productive performance and physiological responses of poultry. *World's Poultry Science Journal*. 2019; 75(2): 273–284. <https://doi.org/10.1017/S0043933919000187>
40. Wang L., Xie J., Wu W., Li B., Ou J. Excellent microbial cultivation for astaxanthin production and its extraction by *Rhodotorula benthica*. *Med. Res.* 2018; 2(4): 180015. <https://doi.org/10.21127/yaoyimr20180015>
41. Dávila-Ramírez J.L. et al. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, blood metabolites, carcass traits, quality, and sensorial traits of meat from pigs under heat stress. *Animal Feed Science and Technology*. 2020; 267: 114573. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2020.114573>
42. Haddad S.G., Goussous S.N. Effect of yeast culture supplementation on nutrient intake, digestibility and growth performance of Awassi lambs. *Animal Feed Science and Technology*. 2005; 118(3–4): 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2004.10.003>
43. Lei Y., Kim I.H. Effect of *Phaffia rhodozyma* on performance, nutrient digestibility, blood characteristics, and meat quality in finishing pigs. *Journal of Animal Science*. 2014; 92(1): 171–176. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6749>
44. Song B. et al. Dietary Supplementation of Yeast Culture Into Pelleted Total Mixed Rations Improves the Growth Performance of Fattening Lambs. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 657816. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.657816>
45. Ayiku S., Shen J.-f., Tan B.-p., Dong X.-h., Liu H.-y. Effects of dietary yeast culture on shrimp growth, immune response, intestinal health and disease resistance against *Vibrio harveyi*. *Fish & Shellfish Immunology*. 2020; 102: 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.04.036>
46. Srinual O. et al. Can Red Yeast (*Sporidiobolus pararoseus*) Be Used as a Novel Feed Additive for Mycotoxin Binders in Broiler Chickens?. *Toxins*. 2022; 14(10): 678. <https://doi.org/10.3390/toxins14100678>
47. Yaderets V.V., Karpova N.V., Glagoleva E.V., Petrova K.S., Shibaeva A.S., Dzhavakhiya V.V. Carotenoids: Overview of the main methods and conditions of their preparation. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024; 14(1): 41–54 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/achb.905>
48. Ozdemirov A.A., Krupin E.O. Comparative Analysis of Livestock Production Indicators in the Republic of Dagestan and the Republic of Tatarstan (2011–2022). *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2025; 15(3): 37–52 (in Russian). <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-3-35-50>
49. Krupin E.O., Shakirov S.K., Tagirov M.Sh. Some results of the use of a new fodder concentrate in feeding of dairy cows. *Dairy and beef cattle farming*. 2017; (6): 22–25 (in Russian). EDN ZSIEQN
50. Terebova S.V., Nikulin Yu.P., Nikulina O.A., Cherepanova E.K. Use of the feed additive “Levibio” in growing young sheep. *Agrarian science*. 2025; (7): 62–70 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-62-70>

ОБ АВТОРАХ

Надия Радиковна Касанова¹

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биологии, генетики, общей и биологической химии
 nadia-kasanova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3679-9155>

Мунира Кабировна Гайнуллина¹

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая кафедрой технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции
 gainullinamun@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3539-4065>

Дмитрий Богданович Просвирников²

доктор технических наук, профессор кафедры химической кибернетики
 prosvirnikov_dmi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6736-8788>

Денис Владимирович Тунцев²

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химической кибернетики, ведущий научный сотрудник
 tuncev_d@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1842-5771>

Евгений Олегович Крупин³

доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник отдела физиологии, биохимии, генетики и питания животных
 evgeny.krupin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8086-1788>

Алмаз Шамилевич Саляхов¹

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии производства и переработки сельхозпродукции
 almaz61sh@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6054-5764>

Олег Алексеевич Якимов¹

доктор биологических наук, профессор кафедры технологии производства и переработки сельхозпродукции
 nikita.korolev.1984@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8040-6750>

Екатерина Евгеньевна Головкова¹

студент
 kate.miller.26@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0007-5608-576X>

¹ Казанский государственный аграрный университет», ул. Карла Маркса, 65, Казань, 420015, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д. 68, Казань, 420015, Россия

³ Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Оренбургский тракт, д. 48, Казань, 420059, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Nadiya Radikovna Kasanova¹

Candidate of Agriculture Sciences, Associate Professor of Biology, Genetics, General and Biological Chemistry
 nadia-kasanova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3679-9155>

Munira Kabirovna Gainullina¹

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Production and Processing of agricultural Products
 gainullinamun@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3539-4065>

Dmitry Bogdanovich Prosvirnikov²

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Chemical Cybernetics
 prosvirnikov_dmi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6736-8788>

Denis Vladimirovich Tuntsev²

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical Cybernetics, Leading Researcher
 tuncev_d@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1842-5771>

Evgeny Olegovich Krupin³

Doctor of Veterinary Sciences, Leading Researcher of the Department of Physiology, Biochemistry, Genetics and Animal Nutrition
 evgeny.krupin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8086-1788>

Almaz Shamilevich Salakhov¹

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Production and Processing of agricultural Products
 almaz61sh@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6054-5764>

Oleg Alekseevich Yakimov¹

Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Technology of Production and Processing of agricultural Products
 nikita.korolev.1984@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8040-6750>

Ekaterina Evgenievna Golovkova¹

student
 kate.miller.26@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0007-5608-576X>

¹ Kazan State Agrarian University, 65 Karl Marx st., Kazan, 420015, Russia

² Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx st., Kazan, 420015, Russia

³ Tatar Research Institute of Agriculture is a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", 48 Orenburgsky Trakt, Kazan, 420059, Russia



Е.М. Ермолова¹ ✉
 С.М. Ермолов¹
 Р.А. Максимова¹
 В.И. Косилов²
 Ю.А. Юлдашбаев³
 Е.А. Никонова²
 Р.Г. Калякина²
 Ф.М. Раджабов⁴
 М.Н. Долгая⁵

¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия

² Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

³ Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва Россия

⁴ Таджикский аграрный университет им. Ш. Шотемур, Душанбе, Таджикистан

⁵ ООО «Группа компаний ВИК», Островцы, г.о. Раменский, Московская обл., Россия

✉ zhe1748@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 28.03.2026

© Ермолова Е.М., Ермолов С.М., Максимова Р.А., Косилов В.И., Юлдашбаев Ю.А., Никонова Е.А., Калякина Р.Г., Раджабов Ф.М., Долгая М.Н.



Evgeniya M. Ermolova¹ ✉
 Sergej M. Ermolov¹
 Raychan A. Maksimova¹
 Vladimir I. Kosilov²
 Yusupzhan A. Yuldashbaev³
 Elena A. Nikonova²
 Railya G. Kalyakina²
 Farhod M. Rajabov⁴
 Marina N. Dolgaya⁵

¹ South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

² Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

³ Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia

⁴ Tajik Agrarian University named after Sh. Shotemur, Dushanbe, Tajikistan

⁵ «VIC Group of Companies» LLC, Ostrovtsy, Ramenskoye, Moscow region, Russia

✉ zhe1748@mail.ru

Received by the editorial office: 10.12.2025

Accepted in revised: 15.03.2026

Accepted for publication: 28.03.2026

© Ermolova E.M., Ermolov S.M., Maksimova R.A., Kosilov V.I., Yuldashbaev Yu.A., Nikonova E.A., Kalyakina R.G., Rajabov F.M., Dolgaya M.N.

Продуктивность и физико-химические свойства молока при использовании в рационе коров кормовых добавок

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Молочное скотоводство — стратегически важная отрасль экономики, обеспечивающая население ценным продуктом питания. В условиях растущих требований к продуктивности и качеству товара, поиск эффективных и безопасных кормовых добавок для дойных коров является актуальной научной и практической задачей, направленной на интенсификацию отрасли.

Методика. Для проведения научно-хозяйственного опыта были сформированы четыре аналогичные группы дойных коров голштинизированной черно-пестрой породы. Животные контрольной (I) группы получали стандартный основной рацион (ОП). В рационы опытных групп ежедневно добавляли: II группа — «Диатомит» в количестве 100 г на голову, III группа — «Моноспорин» (70 г/гол.), IV группа — «Заслон 2+» (20 г/гол.). Исследование проводилось всю полную лактацию.

Результаты. Применение кормовых добавок достоверно повысило продуктивность и качество молока. Валовой надой за лактацию в группах II-IV превысил контроль на 0,9%, 8,7% и 11,5% соответственно. Существенно улучшился состав молока: содержание жира увеличилось на 2,1–4,9%, белка — на 2,5–11,7%, казеина — на 2,0–7,8%, сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО) — на 0,9–2,8%. Плотность молока возросла на 4,9–9,9%. Максимальный положительный эффект по большинству показателей, включая содержание кальция, был отмечен при использовании добавки «Заслон 2+».

Экономическая эффективность подтвердила целесообразность применения добавок. Дополнительная прибыль от реализации молока составила от 9 309 тыс. руб. во II группе до 14 936 тыс. руб. в IV группе. Уровень рентабельности производства молока в IV группе достиг 24,1%, что на 15,4 процентных пункта выше, чем в контрольной группе, демонстрируя высокую окупаемость вложений.

Ключевые слова: скотоводство, лактация, молочная продуктивность, удой, массовая доля жира и белка в молоке, затраты корма

Для цитирования: Ермолова Е.М. и др. Продуктивность и физико-химические свойства молока при использовании в рационе коров кормовых добавок. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 55–63.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-55-63>

Productivity and physicochemical properties of milk when using feed additives in the diet of cows

ABSTRACT

Relevance. Dairy cattle farming is a strategically important sector of the economy, providing the population with a valuable food product. In the context of growing requirements for productivity and product quality, the search for effective and safe feed additives for dairy cows is an urgent scientific and practical task aimed at intensifying the industry.

Methodology. To conduct a scientific and economic experiment, four similar groups of dairy cows of the Holsteinized Black-and-White breed were formed. Animals of the control (I) group received a standard basic ration (BR). The following were added daily to the rations of the experimental groups: group II — “Diatomite” at a rate of 100 g per head, group III — “Monosporin” (70 g/head), group IV — “Zaslon 2+” (20 g/head). The study was conducted over a full lactation period.

Results. The use of feed additives significantly increased productivity and milk quality. The total milk yield per lactation in groups II-IV exceeded the control by 0.9%, 8.7%, and 11.5%, respectively. The composition of milk improved substantially: fat content increased by 2.1–4.9%, protein by 2.5–11.7%, casein by 2.0–7.8%, and solids-not-fat (SNF) by 0.9–2.8%. Milk density increased by 4.9–9.9%. The greatest positive effect on most indicators, including calcium content, was observed with the use of the “Zaslon 2+” additive. Economic efficiency confirmed the feasibility of using the additives. Additional profit from milk sales ranged from 9,309 thousand rubles in group II to 14,936 thousand rubles in group IV. The profitability level of milk production in group IV reached 24.1%, which is 15.4 percentage points higher than in the control group, demonstrating a high return on investment.

Key words: cattle breeding, lactation, milk productivity, milk yield, mass fraction of fat and protein in milk, feed costs

For citation: Ermolova E.M. *et al.* Productivity and physicochemical properties of milk when using feed additives in the diet of cows. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 55–63 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-55-63>

Введение/Introduction

Одна из значимых сельскохозяйственных отраслей в Российской Федерации — молочное скотоводство, целью хозяйственной деятельности которой является производства молока [1, 2].

Россия считается крупнейшим производителем и потребителем молока в мире [3]. Молоко входит в группу основных видов продовольствия по причине наличия важнейших питательных веществ для жизни и здоровья человека [3–5], среди которых кальций, витамины, в частности витамины D и B₁₂, минералы, йод и др. [6, 7].

Качество молока определяется химическим составом, физико-химическими свойствами и гигиеническими параметрами. На них влияют рацион питания, методы содержания, генетика и породы животных, а также физическое состояние или состояние здоровья животных [5, 8, 9]. Именно поэтому молоко включено в перечень основных видов продовольствия во всем мире, а в России производство и потребление этого вида сырья и продовольствия находится под пристальным вниманием государства, т.к. оказывает существенное влияние на состояние продовольственной независимости и безопасности [10, 11].

По данным Министерства сельского хозяйства, РФ в 2022 году было произведено 32,6 млн. тонн молока, что лишь на 60% покрывает потребности в потреблении молока населением [12, 13]. Несмотря на широкую изученность данной проблемы, необходимо подчеркнуть, что она требует своего постоянного мониторинга в разные периоды своего развития [7, 14–16].

Поддержание здоровья и высокой продуктивности молочных коров в значительной степени обеспечивается благодаря хорошо организованной системе кормления. Полноценное кормление животных включает в себя обеспечение их необходимыми питательными веществами, витаминами и минералами в разные физиологические периоды [1, 17–19]. Включение пищевых добавок — распространенная практика в питании жвачных животных. Эта мера принимается в качестве стратегии для повышения эффективности использования питательных веществ рубцовыми микроорганизмами и минимизации потерь энергии и белка в процессе ферментации [4, 8, 17, 18, 20].

Поэтому целью работы экспертов являлось проведение сравнительной характеристики кормовых добавок пробиотического и сорбционного действия в рационах дойных коров их влияние на молочную продуктивность и физико-химические свойства молока.

Рис. 1. Дизайн эксперимента

Fig. 1. Study scheme



Материалы и методы исследования / Materials and methods

Научно-хозяйственный опыт был проведен в производственных условиях ТОО «Карсинское» (Троицкий район, Челябинская область, Российская Федерация).

Эксперимент по применению кормовых добавок был поставлен на голштинизированных черно-пестрых коровах.

На рисунке 1 представлена схема исследований.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с требованиями Директивы Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных¹ и Федерального закона «Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»².

В период проведения опыта животные контрольной группы были на основном рационе, который состоял в зимний период из сена коострецового, силоса кукурузного, концентратов, патоки кормовой, соли поваренной, в летний — зеленой массы, концентратов и соли поваренной. Животные опытных групп к основному рациону получали кормовые добавки:

- «Диатомит» в дозе 100 г/гол.,
- «Моноспорин» 70 г/гол.,
- «Заслон 2+» 20 г/гол. в сутки в течение

3 месяцев.

Корма собственного производства, которые имелись в хозяйстве, полностью обеспечивали потребность животных в них. При расчете рационов кормления по основным питательным веществам

¹ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях. (https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063-rus.pdf)

² Федеральный закон от 27.12.2018 №498-ФЗ (ред. От 24.07.2023) «Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

ориентировались на нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных, разработанные Калашниковым А.П. с соавторами, 2003³.

Исследования кормов проводили в межкафедральной лаборатории ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ» (г. Троицк, Россия).

Отбор проб сырья и продукции проводили в соответствии с ГОСТ 3622⁴, ГОСТ 26809.1⁵. Молочную продуктивность коров определяли во время лактации по контрольным дойкам, проводимым ежемесячно. Массовую долю жира, плотность, СОМО определяли в среднесуточной пробе молока один раз в месяц на анализаторе качества молока «Клевер-2» (Россия), согласно инструкции.

Дегустационную оценку молока, сливок и творога проводили на кафедре «Кормления, гигиены животных, технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции»⁶.

Экономическую эффективность производства молока рассчитывали на основании учета всех затрат на производство продукции⁷.

Все животные во время проведения научно-хозяйственного опыта находились в одинаковых условиях кормления и содержания. Такие производственные процессы, как доение, раздача корма и уборка навоза, проходили механизировано.

Опытные животные обслуживались одной дояркой.

Полученные цифровые данные статистически обработаны с помощью компьютерной программы Microsoft Excel (США) с определением критерия достоверности Стьюдента. Достоверность результата считали при $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Зимний рацион кормления дойных коров в период опыта показал, что тип кормления силосно-сенной. Грубые корма составляли 29%, сочные — 45% и концентрированные — 26%.

Концентрация обменной энергии в контрольной группе и опытных группах была на уровне 9,09 — 9,20 МДж/кг, что соответствует рекомендуемым нормам. Кальций-фосфорное отношение во всех группах было одинаковым и составило 2,1:1,4.

В I контрольной группе количество сухого вещества на 100 кг живой массы было в норме и составило 2,98 кг. У животных, получавших кормовую добавку «Диатомит» (II опытная группа), сухое вещество на 100 кг живой массы было выше и составило 3,06 кг, «Моноспорин» (III группа) — 3,0 и в IV опытной группе, получавшей кормовую добавку «Заслон 2+», — 3,1 кг. В контрольной и опытных группах сахаро-протеиновое отношение было одинаковым и составляло 0,6:0,9.

В летний период тип кормления травяной. Концентрация обменной энергии во всех группах составила 10,6 МДж/кг. Отношение кальция к фосфору во всех группах составляло — 1,7:1,4.

Содержание сухого вещества на 100 кг живой массы на летнем рационе во всех группах было ниже и составляло 1,9 кг.

Отношение сахара к протеину во всех группах составило — 0,7:0,9.

В таблице 1 представлены данные по молочной продуктивности коров.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что среднесуточный удой за лактацию был выше в опытных группах по сравнению с I контрольной группой (14,6 кг), и составил во II опытной группе — 14,7 кг, в III опытной группе — 15,8 кг, в IV опытной группе — 16,2 кг.

Повышение содержания молочного жира в опытных группах произошло при включении в рацион животных кормовых добавок, в среднем за лактацию в 1 контрольной группе содержание молочного жира составило 3,83%, данный показатель был выше во II, III и IV опытных группах чем в контроле, соответственно, на 0,19%, 0,08% и 0,09%.

Дополнительно от одной коровы получено молока больше во II, III и IV опытных группах на

Таблица 1. Продуктивность и содержание жира в молоке коров за период опыта, в среднем на голову ($Sx \pm m$, $n = 10$)
Table 1. Productivity and fat content in milk of cows during the experimental period, on average per head ($Sx \pm m$, $n = 10$)

Показатель	Группа			
	I	II	III	IV
Среднесуточный удой (кг) в % к первой группе	14,06 ± 0,70 100	14,70 ± 0,82 100,7	15,80 ± 1,07 108,2	16,20 ± 1,14 110,9
Содержание жира в молоке в среднем за лактацию, %	3,83 ± 0,12	4,02 ± 0,16	3,91 ± 0,16	3,92 ± 0,15
Валовой надой молока от одной коровы за лактацию, кг	3990,00 ± 0,73	4027,20 ± 0,68	4338,60 ± 0,62	4450,60 ± 0,59
Валовой надой молока базисной жирности от одной коровы за лактацию, кг	4494,60 ± 235,17	4761,60 ± 294,94*	4989,40 ± 344,41*	5131,30 ± 362,97*
Получено молочного жира от одной коровы за лактацию, кг	153,4 ± 8,2	162,6 ± 10,3*	170,3 ± 12,05*	174,8 ± 12,7*

Примечание: * - $P < 0,001$

³ Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. 3-е издание переработанное и дополненное. Под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисинина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. Москва. 2003; 456 с.

⁴ ГОСТ 3622-68 Молоко и молочные продукты. Отбор проб и подготовка их к испытанию.

⁵ ГОСТ 26809.1-2014 Молоко и молочная продукция. Правила приемки, методы отбора и подготовка проб к анализу. Часть 1. Молоко, молочные, молочные составные и молочносодержащие продукты.

⁶ ГОСТ 28283-2015. Молоко коровье. Метод органолептической оценки вкуса и запаха

⁷ Дугин П.И. Экономическая эффективность зооветеринарных мероприятий в молочном скотоводстве. Ярославль: ФГОУ ВПО ЯГСХА, 2012; 168 с.

37,22 кг или 0,9%; 348,6 кг или 8,7% и 460,6 кг или 11,5%, по сравнению с I контрольной группой.

От коров опытных групп, употреблявших кормовые добавки, было получено больше валового надоя молока с базисной жирностью. Так, во II опытной группе на 267 кг, в III опытной на 494,8 кг и в IV опытной группе на 636,7 кг, по сравнению с I контрольной, различия в опытных группах были статистически достоверны ($P < 0,001$).

В IV опытной группе, получавшей кормовую добавку «Заслон 2+», было получено больше молочного жира за лактацию на 21,47 кг, чем в I контрольной группе. Во II и III опытных группах, получавших кормовые добавки «Диатомит» и «Моноспорин», соответственно по группам, получено молочного жира за лактацию больше на 9,2 кг и 16,87 кг, по сравнению с I контрольной группой. В опытных группах различия носили достоверный характер ($P < 0,001$).

Была проведена оценка физико-химических показателей молока в зимне-стойловый и летний периоды. Данные представлены на рисунке 2 и 3.

Результаты показали, в среднем за лактацию лучшим было молоко по содержанию жира от коров II опытной группы (4,02%), которым давалась добавка «Диатомит». Практически на одном уровне содержание жира было у коров III и IV опытных групп, получавших кормовые добавки «Моноспорин» и «Заслон 2+», оно составило 3,91% и 3,92%. У животных I контрольной группы данный показатель составил 3,83%.

Исходя из данных на рисунках 2 и 3 видно, что содержание белка в молоке во все периоды было выше также в опытных группах. В период с февраля по май в I контрольной группе его содержание было 3,07%, что на 0,12%, 0,17% и 0,29% ниже, чем во II, III и IV опытных группах. В период с июня по ноябрь содержание белка во II, III и IV опытных

Рис. 2. Физико-химические показатели молока у коров в зимне-стойловый период (с февраля по май)

Fig. 2. Physicochemical parameters of milk in cows during the winter stall period (from February to May)

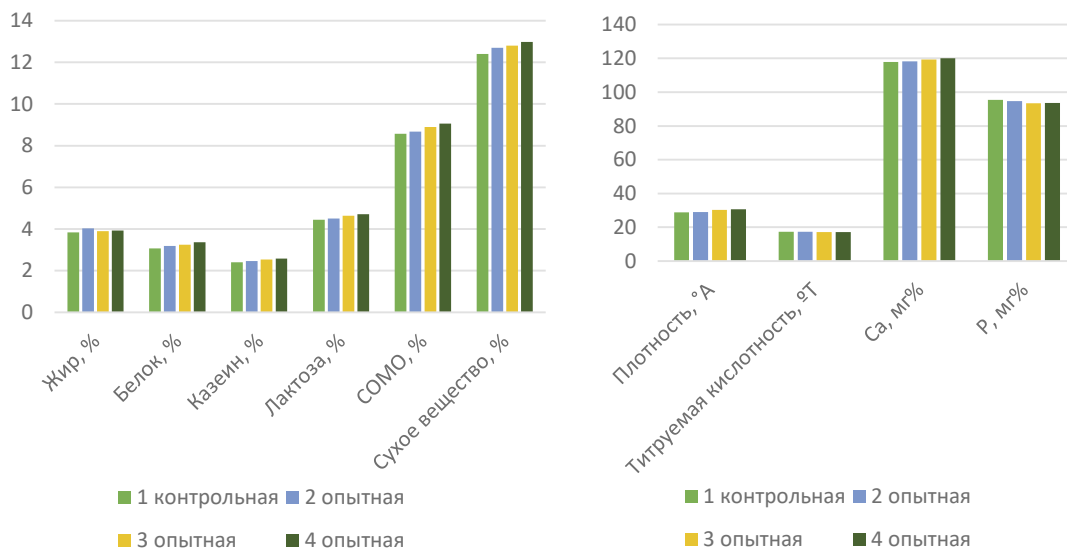
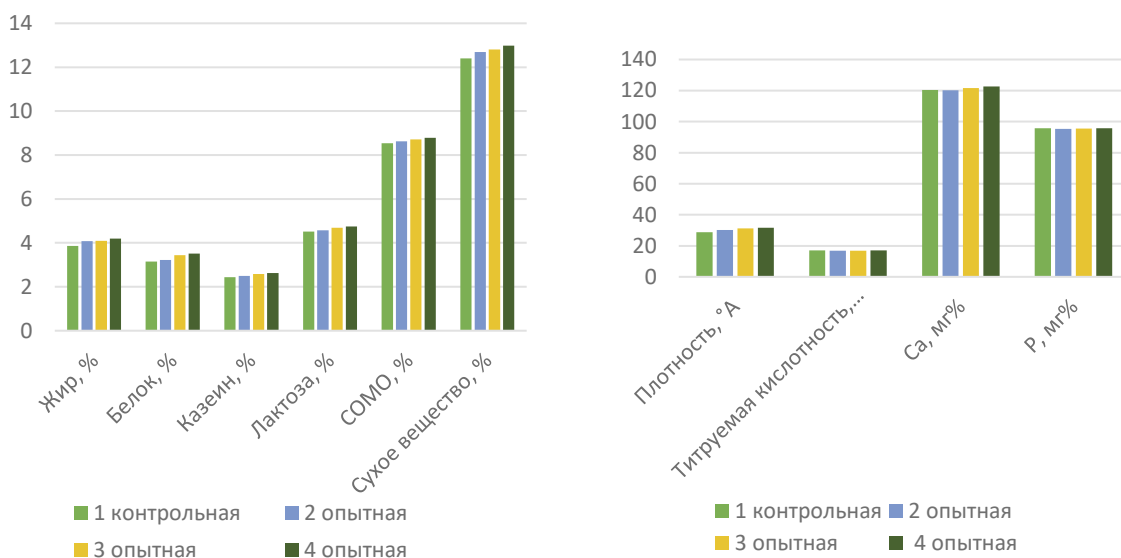


Рис. 3. Физико-химические показатели молока у коров в летний период (с июня по ноябрь)

Fig. 3. Physicochemical parameters of milk in cows in the summer period (from June to November)



группах было больше, по сравнению с I контрольной группой (3,15%), на 0,08%, 0,29% и 0,37%, соответственно.

В период с февраля по май казеин интенсивнее синтезировался у животных IV опытной группы, получавших кормовую добавку «Заслон 2+», он составил 2,58%, что на 0,17%, 0,11% и 0,05% выше результатов, полученных у коров I контрольной группы, II и III опытных групп, соответственно. В период с июня по май значения казеина также были выше у животных IV опытной группы — 2,63%, что больше, чем у животных I контрольной группы, II и III опытных групп на — 0,19%, 0,14% и 0,05%, соответственно.

В период с февраля по май содержание лактозы в IV опытной группе составило 4,71%, что превышает содержание в I контрольной группе, II и III опытных группах на 0,26%, 0,2% и 0,08% соответственно. В период с июня по ноябрь содержание лактозы также было наибольшим в IV опытной группе и составило 4,75%, что больше, чем у животных в I контрольной группе, II и III опытных группах на 0,24%, 0,18% и 0,06% соответственно.

Показатель СОМО в зимне-стойловый период увеличился во II опытной группе на 0,11% (8,67%), в III опытной группе на 0,35% (8,91%), в IV опытной группе на 0,5% (9,06%), по сравнению с I контрольной группой (8,56%). В летний период данный показатель также был выше в опытных группах. Во II опытной группе показатель СОМО составил — 8,62%, в III опытной группе — 8,72% и в IV опытной группе — 8,78%, что больше, чем в I контрольной группе (8,54%) на 0,08%, 0,18% и 0,24%, соответственно.

Содержание сухого вещества в молоке в период с февраля по май во II, III и IV опытных группах увеличилось на 0,3%, 0,41% и 0,58%, соответственно, по сравнению с I контрольной группой (12,40%). В период с июня по ноябрь наибольшее его увеличение было отмечено в IV опытной группе и составило 12,98%, что больше по сравнению с I контрольной группой, II и III опытными группами на — 0,58%, 0,28% и 0,17%, соответственно.

Увеличение плотности молока наблюдается у коров IV опытной группы в течении всего периода проведения научно-хозяйственного опыта.

Из данных рисунка 2 видно, что содержание кальция в молоке было выше у животных IV опытной группы и составляло 120,1 мг%, у животных I контрольной группы, II и III опытных групп этот показатель составил — 117,8 мг%, 118,3 мг% и 119,3 мг%, соответственно, данные статистически достоверны. На рисунке 3 видно, что содержание кальция в молоке было выше также в IV опытной группе — 122,6 мг%, в I контрольной группе, II и III опытных группах, соответственно, 120,3 мг%, 120,2 мг% и 121,7 мг%.

Уровень содержания фосфора в молоке в зимне-стойловый период был во всех группах в пределах от 93,4 до 95,5 мг%, в летний период от 95,3 до 95,7 мг%.

Оценка молока по запаху и вкусу была хорошей во второй и четвертой опытных группах. Полученное молоко от коров этих групп в зимний период оценивалось в 5 баллов, имело чистый, приятный вкус и запах, слегка сладковатый привкус. В летний период эти показатели составили 4,6 и 4,8 балла соответственно. В ходе проведения дегустационной оценки молока, полученного от коров I контрольной и II опытной групп, в летний период результаты были более низкие, что связано, вероятно, с изменениями физико-химического состава молока к завершению лактации. В молоке, полученном от коров II и IV опытных групп в летний период кормления, не было выявлено прогорклого, липолизного вкуса и запаха. Данный фактор может быть связан с тем, что кормовые добавки «Диатомит» и «Заслон 2+», применяемые в этих группах, способствовали замедлению липолиза молока и формированию чистого запаха и вкуса.

Оценка внешнего вида, цвета и консистенции сливок показала, что они представляли собой белую однородную массу (кремообразную при летнем кормлении) без осадка и жирового налета. Дегустационная оценка запаха и вкуса продемонстрировала, что сливки из контрольной группы I, опытной группы III и опытной группы IV (зимнее кормление) показали лучшие результаты, с чистым, приятным вкусом и запахом, слегка сладковатым привкусом. Сливки от коров опытной группы II имели более слабое проявление вкуса и запаха корма (3,6 балла). В летний период кормления лучшие результаты, по дегустационной оценке, были получены только в опытной группе IV (3,8 балла).

При оценке творога, приготовленного из молока коров II опытной группы в конце зимнего периода кормления, был отмечен слабокислый вкус и запах, белый однородный цвет и мазеобразная консистенция (25,4 балла). Лучшим показателем качества отличался творог, полученный из молока коров IV опытной группы (27,6 балла), который имел чистый кисломолочный вкус и запах, белый однородный цвет и рассыпчатую консистенцию. В конце летнего периода кормления гистологические показатели творога контрольной группы I и опытной группы II улучшились. Результаты показали, что творог контрольной группы I (26,8 балла) был равномерно белого цвета, имел чистый кисломолочный вкус и аромат, был мягким по консистенции. Творог из опытной группы II (26,4 балла) имел слегка кисловатый вкус и запах, был белым, однородным по цвету, слегка резиновым, сухим и твердым. Творог из опытной группы III набрал 27,4 балла, хотя органический индекс молока был ниже. Наилучший результат показал творог опытной группы IV (27,8 балла), который имел чистый, кисломолочный запах и вкус, белый цвет, однородную, равномерную и рассыпчатую консистенцию.

В таблице 2 представлен расчет затрат кормов за весь период опыта по изучению влияния кормовых добавок «Диатомит», «Моноспорин» и «Заслон 2+» на молочную продуктивность дойных коров.

Анализируя данные по количеству потребления корма, можно сделать вывод, что животные II опытной группы потребляли больше ЭКЕ на 122 кг, обменной энергии на 1037 МДж, сырого протеина на 18605 г, переваримого протеина на 16104 г, по сравнению с животными I контрольной группы.

В III опытной группе также наблюдается увеличение потребления питательных веществ — ЭКЕ на 30,5, обменной энергии на 244 МДж, сырого протеина на 10858 г, переваримого протеина на 10339,5 г, по сравнению с I контрольной группой.

В IV опытной группе наблюдалось увеличение потребления ЭКЕ на 244 кг, обменной энергии на 2013 МДж, сырого протеина на 30 469,5 г, переваримого протеина на 24064,5 г, по сравнению с I контрольной группой.

При проведении расчетов оплаты корма продукцией в натуральном выражении было выявлено, что затраты ЭКЕ на производство 1 кг молока в III и IV опытных группах были ниже, соответственно, на 7,4% и 1,2%, во II опытной группе было больше на 2,5%, по сравнению с I контрольной группой. Затраты переваримого протеина в III и IV опытных группах были ниже, соответственно, на 5,6% и 4,9%, во II опытной группе на 3,1 больше, по сравнению с I контрольной группой.

Нами был рассчитан ряд показателей по экономической эффективности производства молока с применением кормовых добавок (табл. 3). Проведенный анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что у коров из IV опытной группы удой за лактацию составил 4450,6 кг. Этот показатель превышает аналогичные значения в I контрольной группе, II и III опытных группах на 460,6; 423,4 и 112 кг соответственно. При этом коровы I контрольной группы уступали по объему молока базисной жирности животным II опытной группы на 267 кг, III опытной группы — на 494,8 кг, IV опытной группы — на 636,7 кг.

В связи с повышением молочной продуктивности снизилась себестоимость 1 кг молока в IV опытной группе на 1,7 руб. или на 14,05%, по сравнению с I контрольной. Во II и III опытных группах снижение было на 0,8 и 1,3 руб., или на 6,15% и 10,4%, соответственно, по сравнению с I контрольной группой.

Затраты на производство молока от одной дойной коровы за период опыта в I контрольной группе составили 62 025 руб., в опытных группах с учетом применения кормовых добавок: во II — 62 115 руб., в III — 62 201 руб., в IV — 62 034 руб.

В IV опытной группе прибыль от реализации молока составила в среднем 14 936 руб. на одну голову. Это на 9542 руб. больше, чем в I контрольной группе, на 5627 руб. больше, чем во II опытной группе, и на 2296 руб. больше, чем в III опытной группе.

Уровень рентабельности характеризует окупаемость затрат на производство молока. Установлено, что производство молока было рентабельным во всех группах, но наибольший уровень рентабельности был в IV опытной группе в размере 24,1%, что на 15,4% выше I контрольной группы, и на 9,1 и 3,8% во II и III опытных группах, соответственно.

Таблица 2. Затраты кормов за период опыта (на 1 голову за 305 дней)

Table 2. Feed costs during the experimental period (per head for 305 days)

Показатель	Группа			
	I	II	III	IV
<i>Скормлено кормов:</i>				
- сено костречовое, кг	1006,5	1037	1006,5	1067,5
- силос кукурузный, кг	3324,5	3263,5	3294	3416
- концентраты, кг	884,5	976	915	1006,5
- патока кормовая, кг	152,5	152,5	152,5	152,5
- зеленая масса, кг	4575	4575	4575	4575
- соль поваренная, г	21,35	21,35	21,35	21,35
- «Диатомит», кг	-	9,0	-	-
- «Моноспорин», кг	-	-	6,3	-
- «Заслон 2+», кг	-	-	-	1,8
<i>Скормлено за период опыта всего:</i>				
- ЭКЕ, кг	3233	3355	3263,5	3477
- обменная энергия, МДж	35807	36844	36051	37820
- сырой протеин, г	552233	570838	563091	582702,5
- переваримый протеин, г	392077,5	408181,5	402417	416142
Валовой надой молока, кг	3990	4027,22	4338,6	4450,6
<i>Затрачено на 1 кг молока:</i>				
- ЭКЕ, кг	0,81	0,83	0,75	0,8
- в % к I группе	100	102,5	92,6	98,8
- обменной энергии, МДж	8,97	9,14	8,3	8,5
- в % к I группе	100	101,9	92,5	94,8
- переваримого протеина, г	98,3	101,4	92,8	93,5
- в % к I группе	100	103,1	94,4	95,1

Таблица 3. Экономическая эффективность производства молока (в среднем на голову)

Table 3. Economic efficiency of milk production (average per head)

Показатель	Группа			
	I	II	III	IV
Удой за лактацию, кг	3990	4027,22	4338,6	4450,6
Массовая доля жира в молоке, %	3,83	4,02	3,91	3,92
Получено молока базисной жирности, кг	4494,6	4761,6	4989,4	5131,3
Затраты на производство молока, руб.	62025	62115	62201	62034
Себестоимость 1 кг молока, руб.	13,8	13,0	12,5	12,1
Выручка от реализации, руб.	67419	71424	74841	76970
Прибыль, руб.	5394	9309	12640	14936
Прирост прибыли, руб.	-	+3915	+7246	+9542
Уровень рентабельности, %	8,7	15,0	20,3	24,1

Выводы/Conclusions

Установлено, что включение в рацион дойных коров голштинизированной черно-пестрой породы кормовых добавок «Диатомит» (100 г/гол./сут.), «Моноспорин» (70 г/голю/сут.) и «Заслон 2+» (20 г/гол./сут.) в течение 90 дней (3 месяцев) оказало положительное влияние на продуктивность и качество молока по сравнению с контрольной группой. Показано, что наибольшее увеличение валового надоя за лактацию было в группе, получавшей «Заслон 2+» (+11,5% или 460,6 кг), затем в группе с «Моноспорином» (+8,7% или 348,6 кг). Добавка «Диатомит» оказала минимальное влияние на удой (+0,9% или 37,2 кг). В результате длительного скармливания изучаемых добавок, было зафиксировано при использовании добавки «Заслон 2+»: повышение содержания белка, казеина, лактозы, сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО), кальция и плотности.

Экономический анализ показал, что «Заслон 2+» является наиболее эффективной добавкой, обеспечивая максимальную дополнительную прибыль (14936 руб./гол.) и уровень рентабельности производства молока (24,1%). Добавка «Моноспорин» также показала высокую экономическую эффективность, в то время как добавка «Диатомит» дала незначительный экономический эффект, в основном за счет повышения жирномолочности, при этом затраты корма на единицу продукции в этой группе были выше контрольных. Таким образом, для повышения экономической эффективности молочного скотоводства и комплексного улучшения качества продукции в условиях промышленной технологии наиболее целесообразным является применение кормовой добавки «Заслон 2+» в дозе 20 г на голову в сутки. Добавка «Моноспорин» может рассматриваться как эффективная альтернатива.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелик А.С., Ребезов М.Б., Горелик О.В. Оценка технологических свойств молока коров в зависимости от сезона года. *Аграрная наука*. 2023; (6): 34–38. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-34-38>
2. Горелик А.С., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Молочная продуктивность коров-дочерей голштинских быков-производителей. *Аграрная наука*. 2025; (7): 85–91. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-85-91>
3. Горелик О., Берлад И., Федосеева Н., Тетдоев В. Диатомит для сухостойных коров. *Животноводство России*. 2025; (7): 39–40. <https://doi.org/10.25701/ZZR.2025.07.009>
4. Залилов Р.В., Ребезов М.Б. Перспективность применения минеральных кормовых добавок в животноводстве и птицеводстве. Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Оренбург: Университет. 2014; 1211–1214. EDN SLHGRZ
5. Ермолова Е.М., Ермолов С.М., Косилов В.И. Сапропель в рационах дойных коров и его влияние на продуктивность и качество молока. *Актуальные проблемы и приоритетные направления развития современной ветеринарной медицины и биотехнологий. Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 95-летию со дня основания факультета ветеринарной медицины ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*. Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет. 2025; 501–504. EDN YOZMFP
6. Степанов А.В., Быкова О.А., Костюнина О.В. Жирнокислотный состав молока коров черно-пестрой породы Уральского региона. *Вестник КрасГАУ*. 2022; (12): 181–188. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-12-181-188>
7. Шелехова А.А., Быкова О.А., Бурачевский Н.В. Продуктивные показатели коров при использовании хвойно-иммуноэнергетической добавки. *Молодежь и наука*. 2023; (6): 32. <https://www.elibrary.ru/yeoxqp>
8. Горелик А.С., Ребезов М.Б., Горелик О.В. Физико-химические показатели молока коров с разной долей кровности по голштинской породе. *Аграрная наука*. 2023; (10): 63–67. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-63-67>
9. Kosinski Paglia D. *et al.* Effect of a phytogetic feed additives mixture on milk physico-chemical properties and biochemical parameters of Holstein cows. *Ciência Rural*. 2021; 51(12): e20200682. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200682>

REFERENCES

1. Gorelik A.S., Rebezov M.B., Gorelik O.V. Evaluation of the technological properties of cows' milk depending on the season of the year. *Agrarian science*. 2023; (6): 34–38 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-34-38>
2. Gorelik A.S., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Dairy productivity of cows-daughters of Holstein bulls-producers. *Agrarian science*. 2025; (7): 85–91 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-85-91>
3. Gorelik O., Berlad I., Fedoseyeva N., Tetdoyev V. Diatomite for dry cows. *Animal Husbandry of Russia*. 2025; (7): 39–40 (in Russian). <https://doi.org/10.25701/ZZR.2025.07.009>
4. Zalilov R.V., Rebezov M.B. Prospects for the use of mineral feed additives in livestock and poultry farming. *The University complex as a regional center of education, science, and culture. Proceedings of the All-Russian scientific and methodological conference*. Orenburg: Universitet. 2014; 1211–1214 (in Russian). EDN SLHGRZ
5. Yermolova Ye.M., Yermolov S.M., Kosilov V.I. Sapropel in dairy cow diets and its effect on milk productivity and quality. *Current problems and priority areas for the development of modern veterinary medicine and biotechnology. Proceedings of the National scientific and practical conference with international participation dedicated to the 95th anniversary of the founding of the Faculty of Veterinary Medicine, Orenburg State Agrarian University*. Orenburg: Orenburg State Agrarian University. 2025; 501–504 (in Russian). EDN YOZMFP
6. Stepanov A.V., Bykova O.A., Kostyunina O.V. Fatty acid composition of Black-Mottled breed cows milk of the Ural region. *Bulletin of KSAU*. 2022; (12): 181–188 (in Russian). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-12-181-188>
7. Shelekhova A.A., Bykova O.A., Burachevsky N.V. Productive indicators of cows when using a coniferous immune energy supplement. *Youth and science*. 2023; (6): 32 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yeoxqp>
8. Gorelik A.S., Rebezov M.B., Gorelik O.V. Physico-chemical parameters of milk of cows with different proportions of blood in the Holstein breed. *Agrarian science*. 2023; (10): 63–67 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-63-67>
9. Kosinski Paglia D. *et al.* Effect of a phytogetic feed additives mixture on milk physico-chemical properties and biochemical parameters of Holstein cows. *Ciência Rural*. 2021; 51(12): e20200682. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200682>

10. Быкова О.А., Теплякова Н.В., Косилов В.И. Молочная продуктивность крупного рогатого скота при использовании натуральных кормовых добавок. *Аграрный вестник Урала*. 2025; 25(4): 597–605. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-597-605>

11. Дулепинских Л., Юнусова О., Сычева Л. Бобовые в кормлении молочного скота. *Животноводство России*. 2023; (9): 55–56. <https://doi.org/10.25701/ZZR.2023.09.09.004>

12. Кузьмицкая А.А., Коростелева О.Н., Кубышкин А.В., Хвостенко Т.М. Анализ уровня потребления основных продуктов питания населением как важнейшей компоненты продовольственной безопасности региона. *Аграрная наука*. 2023; (7): 155–162. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-155-162>

13. Батанов С.Д., Амерханов И.А., Баранова И.А., Старостина О.С., Кертиев Р.М. Молочная продуктивность коров разных экстерьерно-конституциональных типов. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2021; (2): 102–113. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-2-102-113>

14. Сычева Л.В., Суханова С.Ф. Использование кормовой добавки «Живой белок» в рационах лактирующих коров. *Вестник Курганской ГСХА*. 2025; (3): 39–45. EDN IQMGTC

15. Сычева Л.В., Юнусова О.Ю. Эффективность скармливания белкового концентрата суксунским коровам. *Пермский аграрный вестник*. 2024; (2): 144–150. EDN QUMMLY

16. Жаймышева С.С., Косилов В.И., Кубатбеков Т.С., Нуржанов Б.С. Влияние пробиотической кормовой добавки BioDarin на продуктивность телок симментальской породы. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017; (3): 138–140. EDN ZAYUYV

17. Trebukhov A.V., Elenschleger A.A. Clinical and biochemical aspects of acetonemia (Ketosis) of dairy cows. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341: 012152. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012152>

18. Trebukhov A., Shaganova E., Momot N., Kolina J., Terebova S. The effect of various additives on milk productivity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1043: 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012025>

19. Горелик О.В., Горелик А.С., Федосеева Н.А., Темербаева М.В. Физико-химические показатели и технологические свойства молока коров в зависимости от линейного происхождения. *Аграрная наука*. 2023; (7): 53–57. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-53-57>

20. Батанов С.Д., Князева О.Ю. Влияние пробиотической добавки на молочную продуктивность и качество молока коров холмогорской породы. *Аграрная наука*. 2012; (5): 29–30. EDN OYRNKV

ОБ АВТОРАХ

Евгения Михайловна Ермолова¹

доктор сельскохозяйственных наук, заведующая кафедрой биологии, экологии, генетики и разведения животных, доцент
zhe1748@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9382-3943>

Сергей Михайлович Ермолов¹

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры птицеводства
sergey.ermolov@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4600-7908>

Раушан Асылбековна Максимова¹

кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры кормления, гигиены животных, технологии производства и переработки сельскохозяйственных животных, ассистент
rauschan-1984@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1844-4024>

Владимир Иванович Косилов²

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства
kosilov_vi@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4754-1771>

10. Bykova O.A., Teplyakova N.V., Kosilov V.I. Milk productivity of cattle when using natural feed additives. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25(4): 597–605 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-597-605>

11. Dulepinskih L., Yunusova O., Sychyova L. Legumes in feeding dairy cattle. *Animal Husbandry of Russia*. 2023; (9): 55–56 (in Russian). <https://doi.org/10.25701/ZZR.2023.09.09.004>

12. Kuzmitskaya A.A., Korosteleva O.N., Kubyshekin A.V., Khvostenko T.M. Analysis of the level of consumption of basic foodstuffs by the population as the most important component of food security in the region. *Agrarian science*. 2023; (7): 155–162 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-155-162>

13. Batanov S.D., Amerkhanov I.A., Baranova I.A., Starostina O.S., Kertiev R.M. Milk productivity of cows of various exterior and constitutional types. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2021; (2): 102–113 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-2-102-113>

14. Sycheva L.V., Sukhanova S.F. Application of the feed additive 'Live protein' in the lactating cows diets. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2025; (3): 39–45 (in Russian). EDN IQMGTC

15. Sycheva L.V., Yunusova O.Yu. Effectiveness of feeding protein concentrate to Suksun cows. *Perm Agrarian Journal*. 2024; (2): 144–150 (in Russian). EDN QUMMLY

16. Zhaimysheva S.S., Kosilov V.I., Kubatbekov T.S., Nurzhanov B.S. Effect of the probiotic feed additive BioDarin on the productivity of Simmental heifers. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2017; (3): 138–140 (in Russian). EDN ZAYUYV

17. Trebukhov A.V., Elenschleger A.A. Clinical and biochemical aspects of acetonemia (Ketosis) of dairy cows. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341: 012152. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012152>

18. Trebukhov A., Shaganova E., Momot N., Kolina J., Terebova S. The effect of various additives on milk productivity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1043: 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012025>

19. Gorelik O.V., Gorelik A.S., Fedoseeva N.A., Temerbaeva M.V. Physical and chemical indicators and technological properties of cow's milk depending on the linear origin. *Agrarian science*. 2023; (7): 53–57 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-53-57>

20. Batanov S.D., Knyaseva O.Yu. Dairy productivity and milk quality of Kholmogorskaya breed cows. *Agrarian science*. 2012; (5): 29–30 (in Russian). EDN OYRNKV

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya Mikhailovna Yermolova¹

doctor of agricultural sciences, head of the department of biology, ecology, genetics and animal breeding, associate professor
zhe1748@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9382-3943>

Sergey Mikhailovich Ermolov¹

candidate of agricultural sciences, associate professor of the department of poultry farming
sergey.ermolov@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4600-7908>

Raushan Asylbekovna Maksimova¹

candidate of agricultural sciences, assistant professor in the department of feeding, animal hygiene, technology of production and processing of farm animals, assistant professor
rauschan-1984@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1844-4024>

Vladimir Ivanovich Kosilov²

doctor of agricultural sciences, professor of the department of technology of production and processing of livestock products
kosilov_vi@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4754-1771>

Юсупжан Артыкович Юлдашбаев³

доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
академик РАН, заведующий кафедрой частной
зоотехнии

yuldashbaev@rgau-msha.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7150-1131>

Елена Антоновна Никонова²

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры
технологии производства и переработки продукции
животноводства

nikonovaea84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0906-8362>

Раиля Губайдулловна Калякина²

кандидат биологических наук, доцент кафедры
лесоводства и лесопаркового хозяйства

kalyakina_railya@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8892-0669>

Фарход Меликбоевич Раджабов⁴

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий
кафедрой технологии переработки продуктов животноводства
и кормления сельскохозяйственных животных

rajabov-65@mail.ru

Марина Николаевна Долгая⁵

кандидат биологических наук, научный редактор

dolgaya@vicgroup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3123-6641>

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет,
ул. им. Ю. Гагарина, 13, Троицк 457100, Россия

²Оренбургский государственный аграрный университет,
ул. Челюскинцев, 18, Оренбург, 460014, Россия

³Российский государственный аграрный университет —
МСХА им. К.А. Тимирязева,
ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127434, Россия

⁴Таджикский аграрный университет им. Ш. Шотемур,
пр-кт Рудаки, 146, Душанбе, 734003, Таджикистан

⁵ООО «ГК ВИК»,
дер. Островцы, квартал 30137, стр. 681, г.о. Раменский,
Московская обл., 140125, Россия

Yusupzhan Artykovich Yuldashbaev³

doctor of agricultural sciences, professor, academician
of the Russian Academy of Sciences, head of the department
of private animal science

yuldashbaev@rgau-msha.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7150-1131>

Elena Antonovna Nikonova²

doctor of agricultural sciences, professor, of the department
of technology of production and processing of livestock
products

nikonovaea84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0906-8362>

Railya Gubaidullova Kalyakina²

candidate of biological sciences, associate professor
at the department of forestry and landscape management

kalyakina_railya@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8892-0669>

Farhod Melikboevich Rajabov⁴

doctor of agricultural sciences, professor,
head of the department of animal product processing
technology and farm animal nutrition

rajabov-65@mail.ru

Marina Nikolaevna Dolgaya⁵

Candidate of Biological Sciences, Scientific Editor

dolgaya@vicgroup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3123-6641>

¹South Ural State Agrarian University,
13 Gagarin st., Troitsk 457100, Russia

²Orenburg State Agrarian University,
18 Chelyuskintsev st., Orenburg, 460014, Russia

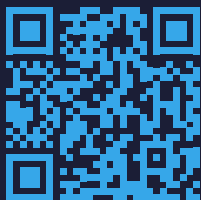
³Russian Timiryazev State Agrarian University,
49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127434, Russia

⁴Tajik Agrarian University named after Sh. Shotemur,
146 Rudaki av., Dushanbe, 734003, Tajikistan

⁵«VIC Group of Companies» LLC,
30137 block, 681 building, Ostrovtsy village, Ramenskoye City
District, Moscow region, 140125, Russia



**Подпишитесь на Telegram канал
ИД «Аграрная наука»**



Еженедельно вы будете получать
свежие новости АПК
и сельского хозяйства,
анонсы отраслевых событий,
знакомьтесь с результатами
научных исследований,
репортажами и интервью.



**Оформите подписку на информационные
e-mail рассылки**



Дважды в неделю на ваш e-mail ящик
будут приходить уведомления
о топовых событиях АПК,
аналитика, прогнозы,
приглашения на выставки
и конференции.

**Через наши рассылки вы можете познакомиться
со своими товарами и услугами
потенциальных клиентов.**

**Связаться с редакцией:
Тел. +7 (495) 777-67-67
(доб. 1453)
agrovetpress@inbox.ru**

А.С. Абдельманова¹ ✉Р.Ю. Чинаров¹А.Н. Родионов¹А.С. Сермягин²В.П. Прожерин³

¹Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, Подольск Московской обл., Россия

²Всероссийский НИИ генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста», Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

³Архангельский НИИ сельского хозяйства – Приморский филиал Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук, Архангельск, Россия

✉ abdelmanova@vij.ru

Поступила в редакцию: 11.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 28.03.2026

© Абдельманова А.С., Чинаров Р.Ю., Родионов А.Н., Сермягин А.А., Прожерин В.П.

Alexandra S. Abdelmanova¹ ✉Roman Yu. Chinarov¹Andrey N. Rodionov¹Alexander A. Sermyagin²Valentin P. Prozherin³

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Podolsk, Moscow region, Russia

²The All-Russian Scientific Research Institute of Genetics and Breeding of Farm Animals – branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Pushkin, St. Petersburg, Russia

³Arkhangelsk Institute of Agriculture – Primorsk branch of the Federal Research Center for the complex studies of Arctic of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

✉ abdelmanova@vij.ru

Received by the editorial office: 11.12.2025

Accepted in revised: 15.03.2026

Accepted for publication: 28.03.2026

© Abdelmanova A.S., Chinarov R.Yu., Rodionov A.N., Sermyagin A.S., Prozherin V.P.

Характеристика аллелофонда быков-производителей холмогорской породы как потенциальных доноров семени для использования в программах сохранения генетических ресурсов

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты исследований аллелофонда быков-производителей холмогорской породы крупного рогатого скота с целью выявления животных для использования в качестве доноров семени в программах сохранения генетических ресурсов. Выборка быков-производителей ($n = 70$) была представлена животными 1989–2021 годов рождения. Для анализа были отобраны 115 831 SNP, прошедших контроль качества, в том числе 73 689 SNP после LD-фильтрации. Генетическая чистопородность, оцененная по степени членства в специфическом для холмогорской породы кластере более 95,0%, была подтверждена у 21 из 37 чистопородных (по данным зоотехнического учета) быков-производителей холмогорской породы. Показана возможность дифференциации геномных компонентов Печорского типа холмогорского скота. Выявлены 6 быков-производителей, несущих более 99,99% геномных компонентов данного типа. Расчет IBS-дистанций показал разную степень генетического родства телок-доноров и быков производителей: 0,680 до 0,727 при среднем значении $0,695 \pm 0,001$. При разработке программ сохранения генетических ресурсов для сохранения геномных компонентов холмогорского скота при поддержании уровня биоразнообразия целесообразно использовать семя быков-производителей с подтвержденной чистопородностью по результатам SNP-анализа и характеризующихся наименьшими значениями генетического родства, оцененного на основании IBS-дистанций.

Ключевые слова: холмогорская порода, гетерогенность подбора, сохранение биоразнообразия, SNP-генотипирование

Для цитирования: Абдельманова А.С., Чинаров Р.Ю., Родионов А.Н., Сермягин А.А., Прожерин В.П. Характеристика аллелофонда быков-производителей холмогорской породы как потенциальных доноров семени для использования в программах сохранения генетических ресурсов. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 64–71. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-64-71>

Characteristics of allele pool of Kholmogor bulls as potential donors of semen for programs of conservation of genetic resources

ABSTRACT

The article presents the results of studies of the allelic pool of breeding bulls of the Kholmogor cattle breed aimed to identify animals for use as donors of semen in genetic resources conservation programs. The sample of breeding bulls ($n = 70$) was represented by animals born in 1989–2021. 115 831 SNPs that passed through the quality control were selected for analysis, including 73 689 SNPs after LD filtration. Twenty-one of 37 purebred (based on pedigree records) bulls were recognized as genetically purebred animals, based on the membership degree in a Kholmogor-specific cluster of more than 95.0%. The possibility of differentiation of genomic components of the Pechora type of Kholmogor cattle was shown. Six breeding bulls carrying more than 99.9% of the genomic components of this type were identified. The calculation of IBS distances showed a different degree of genetic kinship between donor heifers and breeding bulls: 0.680 to 0.727 with an average value of 0.695 ± 0.001 . When developing programs for the conservation of genetic resources to preserve the genomic components of Kholmogor cattle while maintaining the level of biodiversity, it is advisable to use the semen of breeding bulls with confirmed purebredness based on the results of SNP analysis and characterized by the lowest values of genetic kinship estimated by the IBS distances.

Key words: Kholmogor cattle, heterogeneity of selection, conservation of biodiversity, SNP genotyping

For citation: Abdelmanova A.S., Chinarov R.Yu., Rodionov A.N., Sermyagin A.S., Prozherin V.P. Characteristics of allele pool of Kholmogor bulls as potential donors of semen for use in programs of conservation of genetic resources. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 64–71 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-64-71>

Введение/Introduction

Одной из форм сохранения биоразнообразия является поддержание пород животных вне систем сельскохозяйственного производства, для которых был создан генетический ресурс (*ex situ*) [1]. Наиболее эффективной формой сохранения генетических ресурсов *ex situ* является создание криобанков генеративного материала — спермы и эмбрионов¹ [2]. Анализ криобанков генетического материала сельскохозяйственных животных, созданных, как в России, так и в мире, показывает, что основным сохраняемым генетическим материалом, является сперма [1]. Однако, для восстановления породы на основании использования только семени требуется проведение серии возвратных скрещиваний, при этом генетическое сходство с исходной породой хотя и может быть повышено посредством увеличения числа генераций возвратных кроссов, однако 100% генетическая оригинальность исходной породы никогда не будет достигнута [3]. В качестве эффективного типа биоматериала для восстановления пород рассматривается создание криобанков эмбрионов [1, 2]. Исследования методами имитационного моделирования показывают, что для эффективного сохранения генетического разнообразия породы в криобанке необходимо размещать не менее 215 эмбрионов [3]. Для локальных пород крупного рогатого скота, имеющих ограниченную численность чистопородного поголовья, для сохранения наибольшего биоразнообразия в форме криобанков эмбрионов, важным является подбор самок — доноров яйцеклеток и самцов — доноров семени, отличающихся наибольшей генетической гетерогенностью.

Одной из старейших отечественных пород является холмогорская. Первые упоминания о присутствии крупного рогатого скота на островах в верховьях Северной Двины, близ города Холмогоры на Севере России относятся к XVI веку [4, 5]. На протяжении длительной истории хорошие пастбища и сенокосы в зоне разведения холмогорского скота способствовали выведению высококорослой породы, хорошо приспособленной для производства молока. Некоторые авторы указывают, что на формирование холмогорского скота мог оказать влияние голландский крупный рогатый скот, однако большинство исследователей полагают, что иностранные породы, в том числе голштинская, не оказали значительного влияния на формирование современного аллелофонда чистопородного холмогорского скота [6]. В 1960-х годах поголовье холмогорского и ярославского крупного рогатого скота приближалось к миллиону голов (993 и 951 тысяча, соответственно), в то время как в 2015 году численность

племенного поголовья этих пород заметно сократилась до 222,9 и 50,5 тысяч голов, соответственно [7]. Численность племенной популяции крупного рогатого скота холмогорской породы в настоящее время (2024 г.) составляет соответственно 41,72 тыс. голов, в том числе 25,20 тыс. коров². В течение последних десятилетий, наряду со значительным сокращением численности популяции, среди оставшихся чистопородных животных активно применялось скрещивание с голштинской породой, которое могло привести к эрозии специфических генетических компонентов холмогорского скота [8–10]. По результатам полногеномного SNP-генотипирования и анализа STR-маркеров было показано, что в холмогорской породе сохранились животные, на формирование аллелофонда которых зарубежные породы не оказали существенного влияния, что делает их ценным национальным генетическим ресурсом [11–13]. Сохранение исторических компонентов в современной популяции холмогорской породы было подтверждено изучением исторических образцов [14–16]. Было показано, что прилитие крови голштинского скота оказывает влияние на изменчивость аллелофонда холмогорского скота [17–19].

Активное использование голштинской породы для улучшения холмогорского скота особенно важно учитывать при ведении скотоводства в условиях северных регионов страны. Отмечено, что голштинизация поголовья без изменения условий содержания и кормления не привела к устойчивому увеличению молочной продуктивности [20]. Более высокая продуктивность помесных животных по сравнению с чистопородными аборигенными породами временно поддерживается за счет использования резервов организма и в ущерб репродукции и жизнеспособности [21–23]. Поэтому мониторинг динамики аллельного разнообразия в генофондах разных поколений животных может стать инструментом повышения эффективности дальнейшей селекционной работы [24].

Внутри породы выделяют Печорский тип, который был выведен в 50-х годах прошлого столетия путем поглотительного скрещивания местного маточного аборигенного поголовья Республики Коми с чистопородными холмогорскими быками [25]. До указанного поглотительного скрещивания в селекции местного скота Республики Коми в системе разведения местного скота применялся генофонд других пород, среди которых более широкое племенное использование имела бурая латвийская порода крупного рогатого скота³. Малочисленная группа чистопородных животных данного типа (190 голов, в том числе 140 коров) в настоящее время поддерживаются в генофондных

¹ Innovations in cryoconservation of animal genetic resources – Practical guide. FAO Animal Production and Health Guidelines No. 33 / J. Boes, P. Boettcher, M. Honkatukia eds. // Rome: FAO. 2023. ISBN 978-92-5-137297-5.

² Воскресенский С.Б. и др. (ред.) Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации: 2024 год. Лесные Поляны: ВНИИплем. 2025; 274. ISBN 978-5-87958-453-7

³ Гагиев Г.И. Крупный рогатый скот Коми АССР и пути его дальнейшего совершенствования: дисс. ... канд. с.-х. наук. — М., 1962. — 247 с.

хозяйствах [8]. Научный и практический интерес представляет идентификация животных, несущих специфические для данного типа геномные компоненты, для их использования в программах сохранения генеративного материала.

Целью работы явилась характеристика аллелофонда быков-производителей холмогорской породы для определения потенциальных доноров семени для использования в программах получения эмбрионов *in vitro*, направленных на сохранение биоразнообразия породы.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста в 2024-2025 гг. на холмогорской породе крупного рогатого скота.

Для проведения исследований на основании анализа родословных были отобраны чистопородные телки, а также быки-производители, являющиеся потенциальными донорами генеративного материала (соответственно яйцеклеток и семени) для получения эмбрионов методом экстракорпорального оплодотворения.

Телки 2022 года рождения ($n = 8$), принадлежащие к трем генеалогическим линиям (Хлопчатник 1, Цветок 125 и Рекорд 1), были получены в двух племенных хозяйствах ООО Племяхоз «Ухта-97» и ООО Племяхоз «Извайльский-97» (Республика Коми) и содержались на экспериментальной ферме ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Выборка быков-производителей ($n = 70$) была представлена животными 1989-2021 годов рождения АО «Архангельское» по племенной работе и РГУСП «Коми» по племенной работе и включала 37 чистопородных быков и 33 быка с кровностью по голштинской породе от 3 до 68%, принадлежащих к 11 генеалогическим линиям: Алычек 19 ($n = 2$), Атлет 846 ($n = 2$), Вестник 5584 ($n = 2$), Гармон 140 ($n = 9$), Рекорд 1 ($n = 15$), Комелек 279 ($n = 2$), Любимец 2532 ($n = 1$), Наилучший 7252 ($n = 12$), Пловец 49 ($n = 10$), Хлопчатник 1 ($n = 8$), Цветок 125 ($n = 7$). С целью оценки генетической чистопородности исследуемой выборки холмогорского скота и определения степени адмиксии (прилития крови) голштинского скота, используемого в качестве улучшающей породы, в итоговый набор данных для анализа были включены SNP-генотипы животных голштинской породы ($n = 40$).

Материалом для проведения исследований служили образцы ткани (ушной выщип) телок и образцы семени быков-производителей. Выделение ДНК осуществляли с использованием набора ДНК-Экстрат 2 (ЗАО «Синтол», Россия) в соответствии с рекомендациями

производителя. Полногеномные исследования животных были проведены с использованием ДНК-чипов Bovine GGP HD (GeneSeek, Illumina Inc., США). Контроль качества и фильтрацию данных генотипирования для каждого SNP и каждого образца выполняли с использованием программного пакета PLINK 1.9⁴ (University of South Florida, США), используя следующие фильтры (в скобках даны соответствующие команды в программе PLINK): call-rate по всем исследуемым SNP для индивидуального образца не ниже 90% (--mind); call-rate для каждого из исследованных SNP по всем генотипированным образцам не ниже 90% (--geno); частота встречаемости минорных аллелей (MAF) более 0.05 (--maf); отклонение SNP генотипов от распределения Харди-Вайнберга в совокупности протестированных образцов с достоверностью $p\text{-value} < 10^{-6}$ (--hwe). Для расчета параметров генетического разнообразия (аллельное разнообразие, наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность, коэффициент инбридинга) был использован дополнительный LD-фильтр. Генетическую оценку чистопородности проводили на основании определения членства в соответствующем кластере по результатам Admixture анализа. Для оценки степени генетического родства между телками и быками-производителями выполняли расчет дистанций идентичности по состоянию (IBS) с использованием PLINK 1.9.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В результате полногеномного SNP-генотипирования, последующего контроля качества и фильтрации данных для дальнейшего анализа были отобраны 115831 SNP. Для определения параметров генетического разнообразия был дополнительно использован LD-фильтр, в результате чего число SNP, использованных для анализа, составило 73689 SNP. Расчет параметров генетического разнообразия показал наибольший уровень генетического разнообразия, оцененный по показателям несмещенной ожидаемой гетерозиготности (uHe) и аллельного разнообразия (Ar), в выборке быков-производителей холмогорской породы (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика генетического разнообразия телок и быков-производителей холмогорской породы в сравнении с голштинской породой

Table 1. Characteristics of genetic diversity of heifers and bulls of Kholmogor breed comparing to Holstein breed

Группа	n	Ho	uHe	Ar	uFis [CI]
HLST	40	0,375 ± 0,001	0,376 ± 0,0	1,942 ± 0,001	0,004 [0,003; 0,005]
KHLM_F	8	0,373 ± 0,001	0,367 ± 0,001	1,923 ± 0,001	-0,011 [-0,013; -0,009]
KHLM_M	70	0,383 ± 0,0	0,383 ± 0,0	1,950 ± 0	0,001 [0; 0,002]

Примечание: HLST — голштинская порода; KHLM_F — холмогорская порода (телки); KHLM_M — холмогорская порода (быки); n — число голов; Ho — наблюдаемая гетерозиготность; He — ожидаемая гетерозиготность; Ar — аллельное разнообразие; uFis — индекс фиксации; CI — доверительный интервал.

⁴ <http://zzz.bwh.harvard.edu/plink/>

Вероятно, это является следствием наличия в данной выборке быков с прилитием крови голштинского скота. Другой причиной более высокого генетического разнообразия группы быков-производителей холмогорского скота может быть широкий временной интервал годов рождения быков (более 30 лет), в течение которого могло произойти существенное изменение аллелофонда матерей быков, обусловленное давлением отбора.

Результаты анализа главных компонент (рис. 1) показали наличие четко обособленных друг от друга кластеров, представленных животными холмогорской и голштинской пород, что указывает на их различное генетическое происхождение.

Телки холмогорской породы формируют консолидированную группу, несколько обособленную от массива быков-производителей по компоненте 2, что указывает на развитие данной популяции на основе чистопородных быков-производителей без участия голштинского скота. Учитывая, что группа телок представлена современными животными, а группа быков-производителей — особями 1989–2021-ых годов рождения, локализация

телок может отражать направление действия отбора за 30-летний период. Локализация нескольких особей холмогорской породы в области 0,0 по PC1 указывает на наличие у них относительно высокой доли крови голштинской породы.

Расчет ошибки кросс-валидации (CV) показал минимальное значение CV для числа кластеров $k = 2$, что указывает на происхождение исследуемой выборки от двух предковых популяций. Анализ генетической структуры исследуемой выборки (рис. 2) при $k = 2$ показал распределение исследуемых особей между двумя кластерами в соответствии с их породной принадлежностью. Для телок степень членства в собственном кластере составила $94,8 \pm 0,7\%$ с вариациями у отдельных животных от 91,9 до 97,0%, что свидетельствует об их чистопородности. Наличие незначительной доли голштин-специфических геномных компонентов у холмогорских телок и, наоборот, специфических геномных компонентов холмогорской породы у голштинского скота, может быть следствием их общего происхождения от дунайской ветви *Bos Taurus*.

Рис. 1. Результаты анализа главных компонент (PCA) на основании анализа 115831 SNP для исследуемой выборки холмогорского скота в сравнении с голштинской породой: (A) PC1 — главная компонента 1, PC2 — главная компонента 2; (B) PC1 — главная компонента 1, PC3 — главная компонента 3; в скобках после каждой главной компоненты указана доля изменчивости в общей генетической изменчивости, которая может быть объяснена соответствующей главной компонентой; HLST — голштинская порода; KHLM_F — холмогорская порода (телки); KHLM_M — холмогорская порода (быки).

Fig. 1. Results of principal component analysis (PCA) based on 115831 SNPs for studied sample of Kholmogor cattle comparing to Holstein breed: (A) PC1 — principal component 1, PC2 — principal component 2; (B) PC1 — principal component 1, PC3 — principal component 3; the part of variability in the total genetic variation, which can be explained by the corresponding principal component, is indicated in parentheses after each principal component; HLST — Holstein breed; KHLM_F — Kholmogor breed (females); KHLM_M = Kholmogor breed (males).

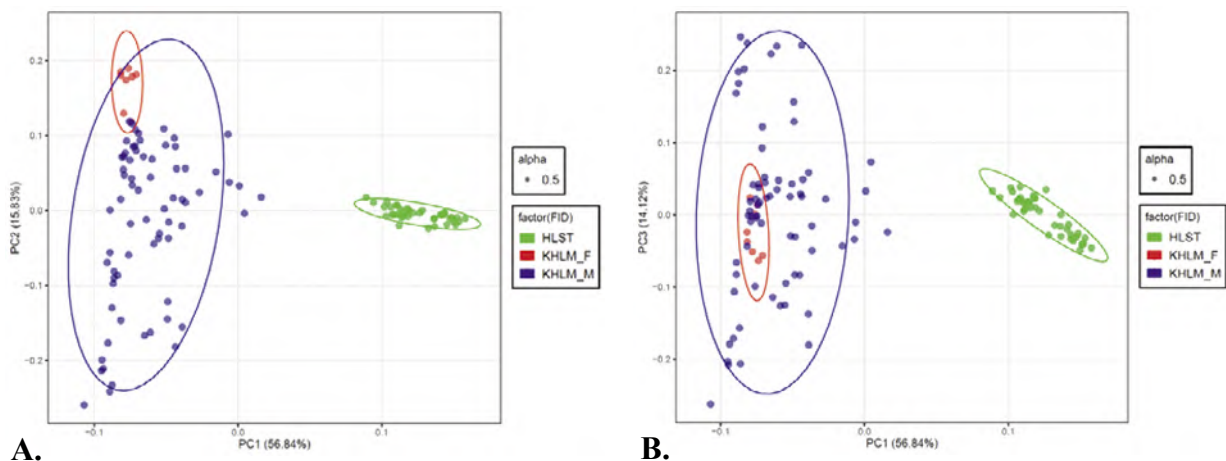


Рис. 2. Генетическая структура изучаемой выборки телок и быков-производителей холмогорской породы в сравнении с голштинской породой по результатам анализа Admixture для числа кластеров $k = 2$: А — телки холмогорской породы; В — быки-производители холмогорской породы; С — быки-производители голштинской породы; KHLM — холмогорская порода; HLST — голштинская порода.

Fig. 2. Genetic structure of studies sample of heifers and bulls of Kholmogor breed comparing to Holstein breed based on Admixture analysis for the number of clusters $k = 2$: А — heifers of Kholmogor breed; В — breeding bulls of Kholmogor breed; С — breeding bulls of Holstein breed; KHLM — Kholmogor breed; HLST — Holstein breed.

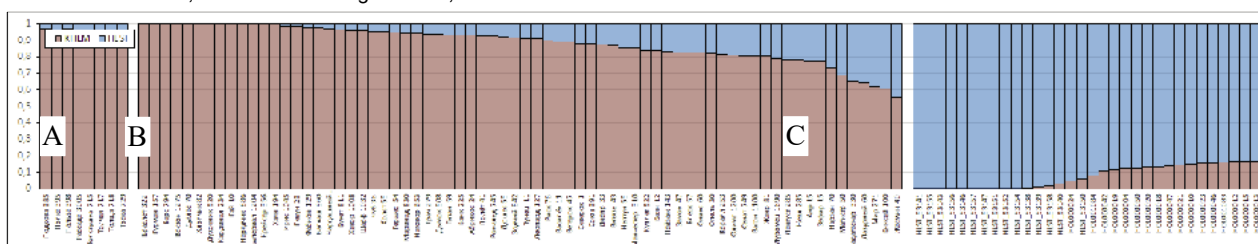
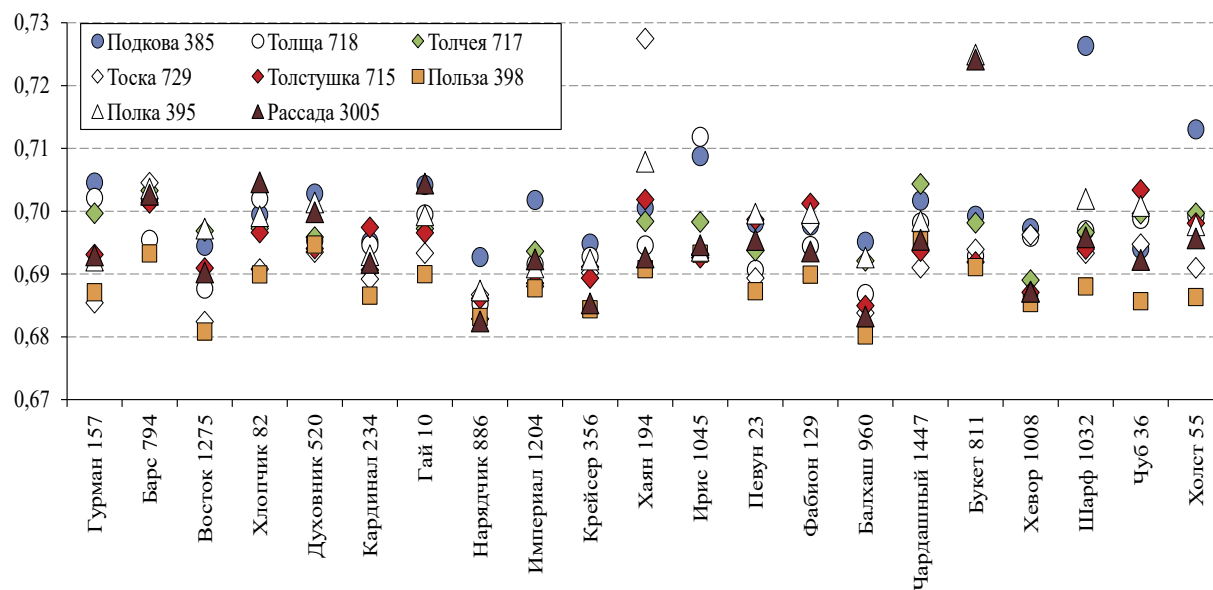


Рис. 5. Генетическое сходство телок-доноров и быков — потенциальных доноров семени, оцененное на основании анализа генотипов по 115831 SNP: ось X — бык-производитель, ось Y — значения IBS-дистанций

Fig. 5. Genetic kinship of donor heifers and bulls — potential donors of semen evaluated based on analysis of genotypes for 115,831 SNPs: axis X — breeding bull; axis Y — the values of IBS-distances.



Гай 10 (дата рождения — 10.01.1996 г.), Хлопчик 82 (15.03.1990 г.), Духовник 520 (05.09.1997 г.), Кардинал 234 (18.11.2000 г.) и два быка линии Рекорда 1: Нарядчик 886 (14.05.2003 г.) и Крейсер 256 (08.12.2000 г.).

Значения IBS-дистанций между телками и генетически чистопородными быками-производителями, характеризующих их генетическое родство, варьировали от 0,680 до 0,727 при среднем значении $0,695 \pm 0,001$ (рис. 5).

Выводы/Conclusions

В результате анализа полногеномных SNP-генотипов установлен более высокий уровень генетического разнообразия быков-производителей холмогорской породы 1989–2021 годов рождения по сравнению с быками-производителями голштинской породы. Показано, что результаты полногеномного SNP-генотипирования могут быть использованы для подтверждения чистопородности племенных животных холмогорской породы. Доказана возможность дифференциации

геномных компонентов Печорского типа холмогорского скота на основании анализа полногеномных SNP-генотипов. Выявлены быки-производители, несущие более 99,99% геномных компонентов данного типа, которые могут быть использованы в программах сохранения Печорского типа холмогорского скота. При разработке программ сохранения генетических ресурсов для поддержания биоразнообразия холмогорского скота при подборе родительских пар целесообразно использовать семя быков-производителей, в родословных которых отсутствуют предки других пород крупного рогатого скота, с подтвержденной чистопородностью по результатам ADMIXTURE-анализа (степень членства в собственном кластере > 95%) и характеризующихся наименьшими значениями генетического родства, оцененного на основе IBS-дистанций. При этом, целесообразно использовать как быков-производителей, несущих геномные компоненты как собственно холмогорского скота, так и печорского типа.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-76-10028

FUNDING

This research was funded by the Russian Science Foundation within project No. 24-76-10028

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Багиров В.А., Зиновьева Н.А. Современное состояние и мировой опыт сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. *Успехи наук о животных*. 2024; (1): 5–24. EDN HFWUEH
- Zinovieva N.A. et al. Conservation of Native Livestock Breeds in Russia: Current State and Promising Prospects. *Animals*. 2025; 15(21): 3103. <http://doi.org/10.3390/ani15213103>

REFERENCES

- Bagirov V.A., Zinovieva N.A. The current state and world experience in the conservation of genetic resources of farm animals. *Ernst Journal of Animal Science*. 2024; (1): 5–24 (in Russian). EDN HFWUEH
- Zinovieva N.A. et al. Conservation of Native Livestock Breeds in Russia: Current State and Promising Prospects. *Animals*. 2025; 15(21): 3103. <http://doi.org/10.3390/ani15213103>

3. Boettcher P.J., Stella A., Pizzi F., Gandini G. The combined use of embryos and semen for cryogenic conservation of mammalian livestock genetic resources. *Genetics Selection Evolution*. 2005; 37(7): 657–675. <http://doi.org/10.1051/gse:2005022>
4. Матюков В.С., Тырина Ю.О., Кантанен Ю., Столповский Ю.А. О генетических особенностях и селекционной ценности местного скота (на примере холмогорской породы). *Сельскохозяйственная биология*. 2013; (2): 19–30. <http://doi.org/10.15389/agrobiology.2013.2.19rus>
5. Эрнст Л.К., Дмитриев Н.Г., Паронян И.А. (сост.). Генетические ресурсы сельскохозяйственных животных в России и сопредельных странах. СПб.: ВНИИГРЖ. 1994; 469. ISBN 92-5-102582-7
6. Матюков В.С., Жариков Я.А., Николаев С.В. Внутрипопуляционная генетическая дифференциация быков холмогорской породы Республики Коми по микросателлитам. *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук*. 2025; (1): 75–82. <http://doi.org/10.19110/1994-5655-2025-1-75-82>
7. Дунин И.М., Дунин М.И., Аджибеков В.К. Породная и генетико-селекционная база домашнего скота в животноводстве. *Зоотехния*. 2021; (1): 2–6. <http://doi.org/10.25708/ZT.2020.66.16.001>
8. Николаев С.В., Ялуга В.Л. Генетическая характеристика быков-производителей холмогорской породы в зависимости от их линейной принадлежности и уровня голштинизации. *Аграрная наука*. 2024; (6): 77–81. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-77-81>
9. Прожерин В.П., Селькова И.В., Калашников А.Е. Генетическая изменчивость быков-производителей архангельской популяции холмогорской породы крупного рогатого скота по поколениям. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева*. 2020; (4): 47–54. <http://doi.org/10.36508/RSATU.2020.48.4.007>
10. Мещеров Р.К., Ходыков В.П., Мещеров Ш.Р., Никулкин Н.С. Породная инвентаризация племенных ресурсов холмогорской породы крупного рогатого скота в Российской Федерации. *Агро-Зоотехника*. 2022; 5(1). <https://doi.org/10.15838/alt.2022.5.1.6>
11. Sermyagin A.A. *et al.* Whole-genome SNP analysis elucidates the genetic structure of Russian cattle and its relationship with Eurasian taurine breeds. *Genetics Selection Evolution*. 2018; 50: 37. <http://doi.org/10.1186/s12711-018-0408-8>
12. Yurchenko A. *et al.* Genome-wide genotyping uncovers genetic profiles and history of the Russian cattle breeds. *Heredity*. 2018; 120(2): 125–137. <http://doi.org/10.1038/s41437-017-0024-3>
13. Волкова В.В., Романенкова О.С., Денискова Т.Е., Мишина А.И., Костюнина О.В., Зиновьева Н.А. Характеристика аллелофонда холмогорской породы крупного рогатого скота с использованием STR-маркеров. *Молочное и мясное скотоводство*. 2019; (7): 3–7. EDN AEVYPA
14. Матюков В.С., Жариков Я.А. Генетическое разнообразие сохраненной и предковой популяций чистопородного холмогорского скота Республики Коми. *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук*. 2023; (7): 103–111. <http://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-7-103-111>
15. Buggiotti L. *et al.* Demographic History, Adaptation, and NRAP Convergent Evolution at Amino Acid Residue 100 in the World Northernmost Cattle from Siberia. *Molecular Biology and Evolution*. 2021; 38(8): 3093–3110. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab078>
16. Абдельманова А.С. и др. Оценка генетических взаимосвязей пород крупного рогатого скота черно-пестрого корня с предковыми популяциями на основе полногеномного SNP-генотипирования современных и музейных образцов. *Сельскохозяйственная биология*. 2024; 59(4): 605–619. EDN WENODK
17. Калашников А.Е., Ялуга В.Л. Изменение встречаемости аллелей EAB-локуса групп крови у скота холмогорской породы вследствие голштинизации. *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова*. 2022; (3): 66–78. <http://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-3-37-66-78>
18. Шукюрова Е.Б. Аллелофонд голштинизированного крупного рогатого скота холмогорской породы, разводимого в Камчатском крае. *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. 2025; (2): 44–51. <http://doi.org/10.34655/bgsha.2025.79.2.006>
19. Матюков В.С., Лейченко А.С., Жариков Я.А., Николаев С.В. Структура STR-аллелофонда популяции быков холмогорской породы банка криоконсервированного семени, сохраненного в Республике Коми. *Генетика*. 2025; 61(1): 82–90. <https://doi.org/10.7868/s3034510325010081>
3. Boettcher P.J., Stella A., Pizzi F., Gandini G. The combined use of embryos and semen for cryogenic conservation of mammalian livestock genetic resources. *Genetics Selection Evolution*. 2005; 37(7): 657–675. <http://doi.org/10.1051/gse:2005022>
4. Matyukov V.S., Tyrina Yu.O., Kantanen Yu., Stolpovskii Yu.A., About features and selective value of the gene pool in local cattle (for Kholmogory breed as an example). *Agricultural Biology*. 2013; (2): 19–30. <http://doi.org/10.15389/agrobiology.2013.2.19eng>
5. Ernst L.K., Dmitriyev N.G., Paronyan I.A. (comps.). Genetic resources of farm animals in Russia and neighboring countries. St. Petersburg: All-Russian Research Institute of Genetics and Breeding of Farm Animals. 1994; 469 (in Russian). ISBN 92-5-102582-7
6. Matyukov V.S., Zharikov Ya.A., Nikolaev S.V. Intrapopulation genetic differentiation of bulls of the Kholmogory breed in the Komi Republic by microsatellites. *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2025; (1): 75–82 (in Russian). <http://doi.org/10.19110/1994-5655-2025-1-75-82>
7. Dunin I.M., Dunin M.I., Adzhibekov V.K. Breed and genetic-breeding base of domestic animal husbandry. *Zootekhnika*. 2021; (1): 2–6 (in Russian). <http://doi.org/10.25708/ZT.2020.66.16.001>
8. Nikolaev S.V., Yaluga V.L. Genetic characteristics of producing bulls of the Kholmogorsky breed, depending on their linear affiliation and the level of Holstein. *Agrarian science*. 2024; (6): 77–81 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-77-81>
9. Prozherin V., Selkova I., Kalashnikov A. Genetic variability of sire bulls in the Arkhangelsk population of the Kholmogory breed when observed over generations. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2020; (4): 47–54 (in Russian). <http://doi.org/10.36508/RSATU.2020.48.4.007>
10. Meshchero R.K., Khodykov V.P., Meshchero Sh.R., Nikulkin N.S. Breed inventory of the breeding resources of Kholmogorsky Cattle Breed in the Russian Federation. *Agricultural and Livestock Technology*. 2022; 5(1) (in Russian). <https://doi.org/10.15838/alt.2022.5.1.6>
11. Sermyagin A.A. *et al.* Whole-genome SNP analysis elucidates the genetic structure of Russian cattle and its relationship with Eurasian taurine breeds. *Genetics Selection Evolution*. 2018; 50: 37. <http://doi.org/10.1186/s12711-018-0408-8>
12. Yurchenko A. *et al.* Genome-wide genotyping uncovers genetic profiles and history of the Russian cattle breeds. *Heredity*. 2018; 120(2): 125–137. <http://doi.org/10.1038/s41437-017-0024-3>
13. Volkova V.V., Romanenkova O.S., Denisikova T.E., Mishina A.I., Kostyunina O.V., Zinovieva N.A. Assessment of the allele pool of the Kholmogory cattle breed with using STR-markers. *Dairy and beef cattle farming*. 2019; (7): 3–7 (in Russian). EDN AEVYPA
14. Matyukov V.S., Zharikov Ya.A. Genetic diversity of today's and ancestral populations of purebred Kholmogory cattle in the Komi Republic. *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2023; (7): 103–111 (in Russian). <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-7-103-111>
15. Buggiotti L. *et al.* Demographic History, Adaptation, and NRAP Convergent Evolution at Amino Acid Residue 100 in the World Northernmost Cattle from Siberia. *Molecular Biology and Evolution*. 2021; 38(8): 3093–3110. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab078>
16. Abdelmanova A.S. *et al.* Estimation of genetic relationships of Black-and-White cattle breeds with ancestral populations based of genome-wide SNP-genotyping of modern and museum samples. *Agricultural Biology*. 2024; 59(4): 605–619. <http://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.4.605eng>
17. Kalashnikov A.E., Yaluga V.L. Changes in the occurrence of alleles of the EAB-locus of blood groups in cattle of the Kholmogorsky breed due to holsteinization. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022; (3): 66–78 (in Russian). <http://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-3-37-66-78>
18. Shukyurova E.B. Allelofond of the holstenized cattle of Kholmogorskaya breed raised in the Kamchatka Region. *Buryat Agrarian Journal*. 2025; (2): 44–51 (in Russian). <http://doi.org/10.34655/bgsha.2025.79.2.006>
19. Matyukov V.S., Leichenko A.S., Zharikov Ya.A., Nikolaev S.V. Structure of the STR Allele Pool of the Population of Kholmogory Breed Bulls, Saved in the Komi Republic of the Bank of Frosted Semen. *Russian Journal of Genetics*. 2025; 61(1): 82–90 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/s3034510325010081>

20. Фирсова Э.В., Митюков А.С. Молочное скотоводство Мурманской области. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020; 59: 92–96. EDN CTEKSH

21. Матюков В.С., Жариков Я.А., Лобов Д.В. Сохранить холмогорскую породу — основу органического сельского хозяйства на севере. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2019; 55: 63–69. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-12063>

22. Мальцева И.С. Вопросы комплексного развития молочно-мясного скотоводства Республики Коми. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2024; (1): 82–92. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2024.83.006>

23. Мальцева И.С. Подходы к формированию устойчивого скотоводства в северном регионе. Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера — 2024. *Сборник статей Девятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», посвященной Дню российской науки*. Саратов. 2025; 25–30. EDN FKVGT

24. Бахтина С.Ю., Парамонова М.А., Ганиева И.Н. Динамика генетического разнообразия в поколениях крупного рогатого скота. *Молодые ученые: преемственность наследия, взгляд в будущее. Сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», посвященной Дню российской науки*. Саратов. 2025; 25–30. EDN ULTNUZ

25. Николаев С.В. Генетическая характеристика Печорского типа холмогорского скота по микросателлитным ДНК-маркерам. *Генетика и разведение животных*. 2020; (4): 61–66. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2020-4-61-66>

20. Firsova E.V., Mityukov A.S. Dairy farming in the Murmansk region. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2020; 59: 92–96 (in Russian). EDN CTEKSH

21. Matyukov V.S., Zharikov Ya.A., Lobov D.V. Kholmogory breed keeping as a base of organic agriculture in the north. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2019; 55: 63–69 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-12063>

22. Maltseva I.S. Dairy and beef cattle breeding in the Komi Republic: integrated management issues. *The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2024; (1): 82–92 (in Russian). <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2024.83.006>

23. Mal'tseva I.S. Approaches to the formation of sustainable cattle breeding in the northern region. *Current problems, directions and mechanisms for the development of productive forces of the North-2024. Proceedings of the Ninth All-Russian scientific and practical conference (with international participation)*. Voronezh: Stroki. 2024; 2: 23–30 (in Russian). EDN FKVGT

24. Bakhtina S.Yu., Paramonova M.A., Ganieva I.N. Dynamics of genetic diversity in cattle generations. *Young scientists: continuity of heritage, looking to the future. Proceedings of the First All-Russian scientific and practical conference of young scientists and specialists of Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn dedicated to Russian Science Day*. Saratov. 2025; 25–30 (in Russian). EDN ULTNUZ

25. Nikolayev S.V. Genetic characteristics of the Pechora type of Kholmogorsky cattle based on microsatellites and DNA markers. *Genetics and breeding of animals*. 2020; (4): 61–66 (in Russian). <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2020-4-61-66>

ОБ АВТОРАХ

Александра Сергеевна Абдельманова¹

доктор биологических наук, старший научный сотрудник
abdelmanova@vij.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>

Роман Юрьевич Чинаров¹

кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник
roman_chinarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6511-5341>

Андрей Николаевич Родионов¹

младший научный сотрудник
rodiand@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2808-4053>

Александр Александрович Сермягин²

кандидат сельскохозяйственных наук, директор филиала
alex_sermyagin85@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1799-6014>

Валентин Петрович Прожерин³

доктор сельскохозяйственных наук,
главный научный сотрудник
pvp.29@mail.ru

¹Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, п. Дубровицы, д. 60, г.о. Подольск Московской обл., 142132 Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста», Московское шоссе, 55А, Пушкин, Санкт-Петербург, 196601, Россия

³Архангельский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — Приморский филиал Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова Уральского отделения Российской академии наук, Никольский проспект, 20, Архангельск, 163020 Россия

ABOUT THE AUTHORS

Alexandra Sergeevna Abdelmanova¹

Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher
abdelmanova@vij.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>

Roman Yurievich Chinarov¹

Candidate of Veterinary Sciences, Senior Researcher
roman_chinarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6511-5341>

Andrey Nikolaevich Rodionov¹

Junior Researcher
rodiand@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2808-4053>

Alexander Alexandrovich Sermyagin²

Candidate of Agricultural Sciences, Director of Branch
alex_sermyagin85@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1799-6014>

Valentin Petrovich Prozherin³

Doctor of Agricultural Sciences,
Chief Researcher
pvp.29@mail.ru

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy settlement, Podolsk, Moscow region, 142132, Russia

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding — Branch of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 55A Moskovskoe shosse, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russia

³Arkhangelsk Institute of Agriculture — Primorsk branch of the Federal research center for complex studies of Arctic of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky avenue, Arkhangelsk, 163020 Russia

УДК 581.48:631.53.027:581.142

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-72-79

А.Ю. Иванова ✉

Е.В. Лесик

Амурский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанического сада-института Дальневосточного отделения Российской академии наук, Благовещенск, Россия

✉ Anya1-88@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.12.2025

Одобрена после рецензирования: 11.02.2026

Принята к публикации: 25.02.2026

© Иванова А.Ю., Лесик Е.В.

Эффективность предпосевной обработки семян растений рода *Pennisetum* Rich. стимуляторами роста

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Биология семян растений рода *Pennisetum* Rich. мало изучена. Высокая семенная продуктивность, благоприятные температурные условия хранения не всегда дают высокий процент всхожести семян при выращивании их в открытом грунте. Замачивание семян в стимуляторах роста является перспективным способом повышения их посевных качеств.

Материалы и методы. Материалом для исследования были выбраны семена 5 сортов *P. glaucum* (L.) R.Br. и двух видов *P. setaceum* (Forssk.) Chiov. и *P. villosum* R. Br. ex Fresen. 2022–2023 гг. сбора с периодом хранения 6 и 24 месяца. Подготовленный семенной материал замачивали в 5 растворах ростостимуляторов: *Эпин-Экстра*, *НВ-101*, *Бона Форте Эликсир*, *Хлорелла*, *Биогумат+9*. Энергию прорастания и всхожесть определяли в соответствии с ГОСТ 12038–84.

Результаты. В результате эксперимента было определено положительное влияние стимуляторов роста на динамику прорастания семенного материала у всех видов и сортов *Pennisetum*. Для всех сортов *P. glaucum* препараты *НВ-101* и *Эпин-Экстра* оказались менее эффективными на семенах 2023 г. с наименьшим периодом хранения. Выявлены средние и высокие показатели лабораторной всхожести у семян 2022–2023 гг. сбора и у единичных сортов *P. glaucum* 2023 г. со сроком хранения 6 мес. Для достижения высоких показателей всхожести, свыше 80% у сортов *P. glaucum* рекомендуем применять препараты на семенном материале с периодом хранения от 24 месяцев. Из всех изученных препаратов существенное увеличение показателей всхожести на семена *P. setaceum* оказали препараты *Биогумат+9*, *Хлорелла*, *Эпин-Экстра*, для *P. villosum* — *Биогумат+9* и *Бона Форте Эликсир*.

Ключевые слова: *Pennisetum*, сорт, вид, качество семян, замачивание семян, энергия прорастания, лабораторная всхожесть, стимуляторы роста

Для цитирования: Иванова А.Ю., Лесик Е.В. Эффективность предпосевной обработки семян растений рода *Pennisetum* Rich. стимуляторами роста. *Аграрная наука*. 2026; 405(04): 72–79.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-72-79>

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-72-79

Anna Y. Ivanova ✉

Elena V. Lesik

Amur branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Amur Region, Blagoveshchensk, Russia

✉ Anya1-88@mail.ru

Received by the editorial office: 10.12.2025

Accepted in revised: 11.02.2026

Accepted for publication: 25.02.2026

© Ivanova A.Yu., Lesik E.V.

Effectiveness of pre-sowing treatment of seeds of plants of the genus *Pennisetum* Rich. with growth stimulants

ABSTRACT

Relevance. Biology of seeds of plants of the genus *Pennisetum* Rich. little studied. High seed productivity and favorable temperature storage conditions do not always provide a high percentage of seed germination when grown in open ground. Soaking seeds in growth stimulants is a promising way to improve their sowing qualities.

Materials and methods. Five varieties of *P. glaucum* (L.) R.Br. and two species of *P. setaceum* (Forssk.) Chiov. and *P. villosum* R. Br. ex Fresen. were chosen as the material for the study. The prepared seed material was soaked in 5 solutions of growth stimulants: *Epin-Extra*, *HB-101*, *Bona Forte Elixir*, *Chlorella*, *Biohumate + 9*. Germination energy and germination were determined in accordance with GOST 12038–84.

Results. As a result of the experiment, a positive effect of growth stimulants on the germination dynamics of seed material was determined for all species and varieties of *Pennisetum*. For all varieties of *P. glaucum*, the preparations *HB-101* and *Epin-Extra* were less effective on seeds of 2023 with the shortest storage period. The average and high laboratory germination rates were found in seeds harvested in 2022–2023 and in individual varieties of *P. glaucum* harvested in 2023 with a shelf life of 6 months. To achieve high germination rates of over 80% in *P. glaucum* varieties, we recommend using seed treatments with a shelf life of at least 24 months. Of all the studied preparations, *Biohumate+9*, *Chlorella*, and *Epin-Extra* had a significant effect on the germination rate of *P. setaceum* seeds, while *Biohumate+9* and *Bona Forte Elixir* had a significant effect on the germination rate of *P. villosum* seeds.

Key words: *Pennisetum*, variety, species, seed quality, seed soaking, germination energy, laboratory germination, growth stimulants

For citation: Ivanova A.Yu., Lesik E.V. Effectiveness of pre-sowing treatment of seeds of plants of the genus *Pennisetum* Rich. with growth stimulants. *Agrarian science*. 2026; 405(04): 72–79 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-72-79>

Введение/Introduction

В настоящее время существует множество препаратов нового поколения для предпосевной обработки семян природного происхождения (из растений выделено около 85 различных ростостимулирующих компонентов) [1] или синтезированных человеком с целью повышения их посевных качеств. Предпочтение отдают экологически безопасным для окружающей среды и человека ростостимуляторами [2, 3]. Для выращивания сеянцев большое значение имеет класс качества семян, которые характеризуются наилучшей всхожестью. Однако не всегда такие семена доступны производителям посадочного материала. При неправильном или длительном хранении семян их посевные качества могут снижаться. Низкая всхожесть и энергия прорастания отрицательно влияют на выравненность посевов (увеличивается промежуток времени от посева до появления всходов) [4]. Одним из перспективных методов повышения всхожести семян является стимулирующая обработка биологическими препаратами и регуляторами роста [5, 6]. Доказано, что регуляторы роста оказывают положительное действие на всхожесть семян, устойчивость растений к болезням, изменениям экологических факторов, ускорению нарастания биомассы, сокращению трудозатрат на производство сеянцев, увеличение выхода посадочного материала, т. к. регуляторы роста вызывают схожие с фитогормонами реакции [1, 3, 6–8]. Так, в Европе стимуляторы роста (биостимуляторы) активно используются в садоводстве и сельском хозяйстве не только для ускорения роста растений, улучшения всхожести семян, высококачественного посадочного материала [9], но и для преодоления многих абиотических факторов, таких как холод, засуха, засоление почвы, воздействие тяжелых металлов, для борьбы с патогенными бактериями и грибами [10–12]. Биостимуляторы включают в себя разнообразные вещества: от экстрактов растений, водорослей, бактерий, микроэлементов до гуминовых и фульвовых кислот [13–15]. В России зарегистрировано более 100 биостимуляторов роста, объемы производства которых с каждым разом увеличиваются [8]. В нашей стране в отраслях лесовосстановления и озеленения применение ростостимуляторов является сравнительно новым направлением [5, 16], в отличие от сельского хозяйства, где применение стимуляторов роста уже является перспективным направлением [8].

Биология семян растений рода *Pennisetum* Rich. (перистошестинник) мало изучена в почвенно-климатических условиях юга Амурской области. Высокая семенная продуктивность сортов и видов *Pennisetum*, благоприятные температурные условия хранения не всегда дают высокий процент всхожести семян при выращивании их в

открытом грунте. Показатели качества семян одного и того же вида (сорта) не являются постоянной величиной и меняются по годам. Отмечается разность прорастания семян при одинаковых условиях проращивания [16]. Все это может отрицательно сказаться на производстве посадочного материала для проведения научных, селекционных исследований, поставок в торговые точки с целью реализации населению, фирмам-производителям по благоустройству загородных и городских территорий. При предпосевной обработке семян можно повысить всхожесть в пределах 15–24%, а использование стимуляторов роста в малых количествах дает хорошую экономию средств и минимизирует себестоимость посадочного материала [3, 8, 17].

Для получения качественного посадочного материала важна не только наследственная основа и физиологические свойства семян, но и подготовка их к посеву, обработка ростостимуляторами [1, 7, 18].

В настоящее время исследований, описывающих эффективность применения регуляторов роста на посевные качества семян рода *Pennisetum*, недостаточно¹.

Целью настоящего исследования стало изучение влияния ростостимулирующих препаратов на лабораторную всхожесть семян видов (сортов) рода *Pennisetum* разных годов сбора и сроков хранения, интродуцируемых в условиях юга Амурской области.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводились в 2023–2025 гг. на базе УНУ «Коллекции генетических ресурсов растений Амурского филиала Ботанического сада-института ДВО РАН (АФ БСИ ДВО РАН), расположенного на северо-западной окраине Благовещенска, в южной зоне Амурской области.

Материалами для исследования были выбраны пять сортов перистошестинника сизого (*P. glaucum*) — «Величественный фиолетовый», «Пурпурное величество», «Пурпурные свечи», «Пурпурный Барон», «Purple Majesty», а также два вида — перистошестинник щетинистый (*P. setaceum*) и перистошестинник мохнатый (*P. villosum*).

Для больших питомников и торговых сетей срок реализации семенного материала составляет не более 2-х лет. Поэтому в эксперименте мы использовали три варианта семян собственной репродукции 2022 г. с периодом хранения 24 месяца и 2023 г. с периодом хранения 6 и 24 месяца, всего 3 варианта для каждого сорта). Семена хранились при положительно низкой температуре +5 °С.

Растения *P. setaceum* и *P. villosum* представляют большой интерес за счет своей декоративности и успевают проходить все стадии развития

¹ Николаева М.Г., Гладкова В.Н., Разумова М.В. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Н.: Ленинград, 1985; 348

в условиях юга Амурской области, но формируют небольшое количество семян. Из-за ограниченного количества семян не было изучено влияние всех выбранных стимуляторов роста, которые были изучены на сортах.

Высокой считали всхожесть в пределах 70–100%, средней — 40–60%, низкой — ниже 30%. Для исследований визуально отбирали неповрежденные семена.

Подготовленный семенной материал каждого сорта (вида) замачивали в 5 растворах ростостимуляторов: *Эпин-Экстра*, *НВ-101*, *Бона Форте Эликсир*, *Хлорелла*, *Биогумат+9*.

Данные стимуляторы роста были выбраны как более безопасные и не токсичные для окружающей среды, людей, животных и насекомых. Ниже приведена характеристика исследуемых препаратов.

Препараты были приобретены в розничной сети Благовещенска.

Биогумат+9. Концентрированное водорастворимое органическое удобрение, в составе которого уникально сочетаются биоактивные гуминовые вещества и 9 питательных микроэлементов (железо, цинк, марганец, кальций и др.) в легкодоступной для растений форме. Форма препарата: гранулы. Класс опасности: 3В (умеренно опасное вещество). Производитель: ООО «Терра Мастер», Россия, г. Новосибирск.

НВ-101. Не синтезированный, концентрированный питательный состав для культивации растений, выработанный из японского кедр, кипариса, сосны и подорожника (водный раствор). Форма препарата: жидкость. Класс опасности: безопасен для человека и животных. Не токсичен. 100% натуральный. Безвреден для окружающей среды. Производитель: Flora Co. Ltd., Япония.

Бона Форте Эликсир. Экологически чистый универсальный стимулятор и активатор иммунной системы растений. Активные компоненты — биоактивный кремний и экстракт пихты. Форма препарата: жидкость. Класс опасности: 3 (умеренно опасное вещество). Производитель: АО «РУСИНХИМ», Россия, г. Подольск.

Хлорелла. Биостимулятор из 100% микроводоросли *Chlorella vulgaris*. Содержит все необходимые вещества для ускорения роста и развития растений (комплекс фитогормонов и физиологически активных веществ — ауксины, гиббереллины, цитокинины и др.). Форма препарата: порошок. Класс опасности: 4 (неопасное вещество). Производитель: ООО «ФИТОКЛОН», Россия, г. Москва.

Эпин-Экстра. Регулятор роста, применяемый для усиления развития растений, повышения урожайности и качества, устойчивости к неблагоприятным условиям внешней среды (д.в. 24-эпибрасинолида). Форма препарата: жидкость. Класс

Таблица 1. Схема лабораторного опыта с проращиванием семян сортов (видов) рода *Pennisetum*
Table 1. Scheme of laboratory experiment with germination of seeds of varieties (species) of the genus *Pennisetum*

№ п/п	Вариант	Время замачивания, час	Доза препарата
1.	Контроль	24	0 (вода)
2.	Эпин-Экстра	4	0,5 мл на 1 л воды
3.	НВ-101	4	2 капли на 1 л воды
4.	Бона Форте Эликсир	24	5 мл на 1 л воды
5.	Хлорелла	24	1 г на 1 л воды
6.	Биогумат+9	24	15 мл на 0,5 л воды

Примечание: полученные данные обработаны статистически с помощью программы *Microsoft Excel* 1997–2003 (США).

опасности: 4 (малоопасное вещество). Не фитотоксичен. Производитель: АНО «НЭСТ М», Россия, г. Москва.

Семена проращивали в чашках Петри на увлажненной фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой в трехкратной повторности, по 50 шт. при комнатной температуре. Энергия прорастания и лабораторная всхожесть оценивалась в соответствии с ГОСТ 12038-84². Перед закладкой семян на проращивание выдерживали их в водных растворах ростостимуляторов согласно рекомендациям производителя, с временной экспозицией 4 и 24 часа. За контроль брали семена, замоченные в дистиллированной воде комнатной температуры на 24 часа. По истечении временной экспозиции семена раскладывались в чашки Петри и при необходимости смачивались дистиллированной водой.

В лабораторном опыте не проводились наблюдения за влиянием стимуляторов роста на морфологические параметры проростков семян.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Было установлено, что у всех изученных культур 2023 г. с периодом хранения 24 мес. при суточном замачивании семян в воде выявлены высокие показатели всхожести и энергии прорастания (свыше 70%), по сравнению с более коротким сроком хранения (рис. 1, табл. 2). Отмечено, что у семян 4-х сортов *P. glaucum* показатели лабораторной всхожести 2023 г. сбора выше, чем у 2022 г. при хранении 24 мес. У *P. villosum* и *P. setaceum* разница между показателями всхожести у семян 2022-2023 гг. (хранение 24 мес.) незначительна, составила 1% (табл. 2).

При обработке семян стимулятором роста *Эпин-Экстра* (вариант 2) у сорта «Пурпурный Барон», показатели всхожести снизились на 30% по сравнению с контролем (табл. 2). У сортов *P. glaucum* с длительностью хранения 24 мес. наилучшие показатели всхожести, по сравнению с

² ГОСТ 12038-84 Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва: Стандартинформ, 2011. – 64 с.

Рис. 1. Энергия прорастания семян 2023 г. сбора после 6 и 24 мес. хранения
Fig. 1. Germination energy of seeds harvested in 2023 after 6 and 24 months of storage

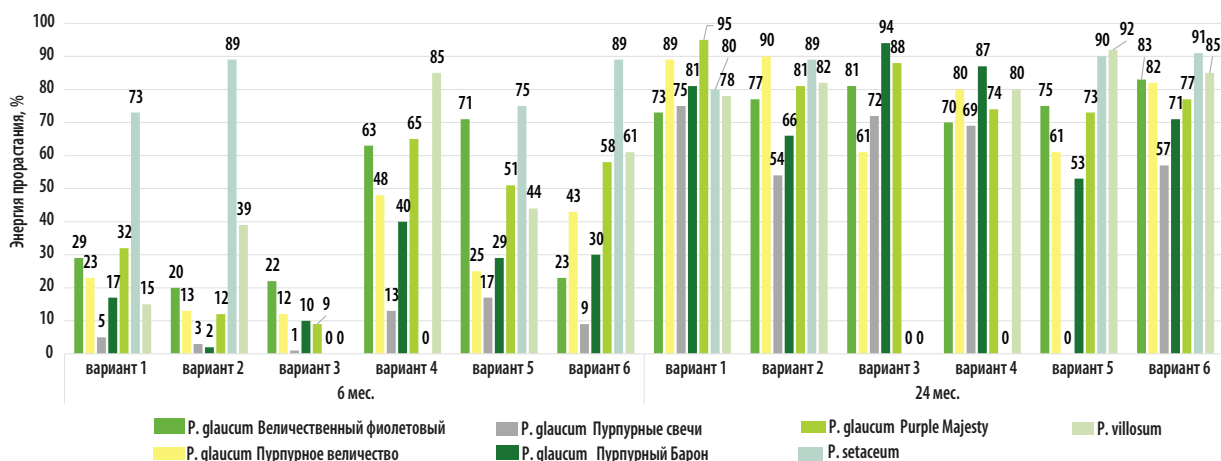


Таблица 2. Лабораторная всхожесть семян 2022–2023 гг. сбора при разных сроках хранения и вариантах предпосевной обработки
Table 2. Laboratory germination of seeds harvested in 2022–2023 at different storage periods and pre-sowing treatment options

№ п/п	Сорт/вид	Год сбора и срок хранения семян, мес.	Лабораторная всхожесть, %					
			Контроль	Эпин-Экстра	НВ-101	Бона Форте Эликсир	Хлорелла	Биогумат+9
			вар. 1	вар. 2	вар. 3	вар. 4	вар. 5	вар. 6
1.	<i>P. glaucum</i> Величественный фиолетовый	2023 6 мес.	51,0±4,5	63,0±3,0	64,0±2,4	72,0±5,0	79,3±2,6	31,0±4,0
		2023 24 мес.	73,0±3,3	83,0±4,9	81,3±3,2	85,0±1,0	85,0±1,7	89,3±1,7
		2022 24 мес.	89,0±4,0	91,3±0,9	91,3±1,6	96,0±1,6	89,0±2,1	95,0±0,9
2.	<i>P. glaucum</i> Пурпурный Барон	2023 6 мес.	42,0±2,1	12,0±1,6	41,0±3,2	59,0±2,1	46,0±4,5	36,0±2,4
		2023 24 мес.	82,0±4,2	80,0±4,0	95,3±3,7	95,0±2,8	67,3±1,8	93,3±4,7
		2022 24 мес.	21,0±0,8	93,3±1,2	87,0±5,1	44,0±5,1	89,0±0,4	45,3±2,0
3.	<i>P. glaucum</i> Пурпурное величество	2023 6 мес.	40,0±5,3	51,0±5,0	43,0±3,4	58,0±5,3	36,0±2,9	53,0±3,4
		2023 24 мес.	90,0±4,1	95,0±2,4	66,0±4,8	97,0±2,0	83,3±3,9	87,3±1,0
		2022 24 мес.	60,3±4,0	75,0±4,4	67,0±2,4	85,3±1,6	79,0±4,6	95,3±0,4
4.	<i>P. glaucum</i> Пурпурные свечи	2023 6 мес.	20,0±1,0	23,0±4,0	7,0±1,0	40,0±1,0	32,0±4,9	23,0±1,3
		2023 24 мес.	80,0±0,8	71,0±0,9	80,0±2,8	87,0±4,0	–*	79,0±1,0
		2022 24 мес.	51,3±0,8	91,0±0,9	95,3±1,2	89,3±2,0	93,0±2,0	85,0±0,9
5.	<i>P. glaucum</i> Purple Majesty	2023 6 мес.	63,0±2,1	53,0±2,1	45,0±5,0	78,0±2,1	65,0±4,7	64,0±4,5
		2023 24 мес.	96,0±1,4	92,0±3,7	90,0±0,4	98,0±3,0	85,0±4,0	89,0±2,5
		2022 24 мес.	65,3±5,2	79,0±2,0	86,0±2,9	72,0±3,2	75,0±1,2	83,3±0,8
6.	<i>P. setaceum</i>	2023 6 мес.	85,0±3,2	96,0±1,4	–*	–*	89,0±1,0	95,0±1,2
		2023 24 мес.	94,0±2,4	97,0±4,1	–*	–*	94,0±3,3	96,0±3,3
		2022 24 мес.	95,3±5,2	98,0±0,8	52,0±4,3	72,0±3,4	91,3±3,3	85,3±1,2
7.	<i>P. villosum</i>	2023 6 мес.	64,0±3,0	74,0±3,0	–*	87,0±1,0	68,0±4,7	87,0±2,5
		2023 24 мес.	98,0±3,4	90,0±2,8	–*	97,0±3,2	95,0±3,5	90,0±2,4
		2022 24 мес.	99,0±2,8	71,0±2,0	–*	89,3±2,8	97,3±0,9	87,0±5,0

Примечание: * всхожесть семян не была изучена из-за отсутствия семян для опыта.

контролем, отмечены у сортов «Величественный фиолетовый» (83%) и «Пурпурное величество» (95%). Для остальных сортов отмечено снижение лабораторной всхожести. Высокие показатели 71–98% были у видов *P. villosum* и *P. setaceum*, независимо от года сбора и срока хранения семян. Увеличение показателей всхожести у семян *P. setaceum* по сравнению с контрольными значениями составило 3–11%. Несмотря на высокие показатели всхожести у *P. villosum*, полученные при использовании Эпин-Экстра, значения в контрольном варианте семян 2022–2023 гг. (при хранении 24 мес.) оказались выше на 8–28% (табл. 2).

Стабильное снижение энергии прорастания в процессе обработки семян стимулятором роста Эпин-Экстра по сравнению с контрольным вариантом наблюдалось у сортов «Purple Majesty» и «Пурпурные свечи» 2023 г. (со сроком хранения 6/24 мес.). Для остальных сортов *P. glaucum* таких же сроков хранения выявлено варьирование показателей в сторону увеличения или уменьшения (рис. 1). У всех сортов *P. glaucum* 2022 г. выявлены наилучшие показатели энергии прорастания, по сравнению с контролем. У *P. villosum* и *P. setaceum* зафиксировано снижение значений на 6–34% (рис. 2).

Третий вариант опыта с применением НВ-101 оказал положительное влияние на показатель всхожести семян сорта «Величественный фиолетовый» 2022–2023 гг. сбора на протяжении 6/24 мес. хранения (табл. 2). Отмечено увеличение всхожести на 2–13%. У остальных сортов *P. glaucum* 2022–2023 гг. выявлено колебание показателей всхожести в сторону увеличения или уменьшения, по сравнению с контролем (табл. 2). Резкое увеличение энергии прорастания выявлено у семян сортов «Пурпурный Барон», «Пурпурные свечи» 2023 г. сбора (6 мес. хранения). Показатели выше контрольных на 42–67%. Для семян 2-х сортов *P. glaucum* с более длительным сроком хранения отмечено увеличение показателей на 8–13%, у 3-х сортов — снижение на 3–28% (рис. 2).

Повышение показателя энергии прорастания, относительно контроля, отмечено у всех сортов

P. glaucum 2022 г. сбора. Максимальные значения получены для сортов «Величественный фиолетовый» (89%), «Пурпурный барон» (87%), «Пурпурные свечи» (90%). Энергия прорастания семян *P. setaceum* составила 44%, что значительно ниже, чем в других вариантах опыта. У «Величественного фиолетового» и «Пурпурные свечи» семена 2022 г. имели всхожесть значительно выше (от 91% до 95%), чем семена 2023 г. с таким же периодом хранения, у них данный показатель находится в пределах 80–81%.

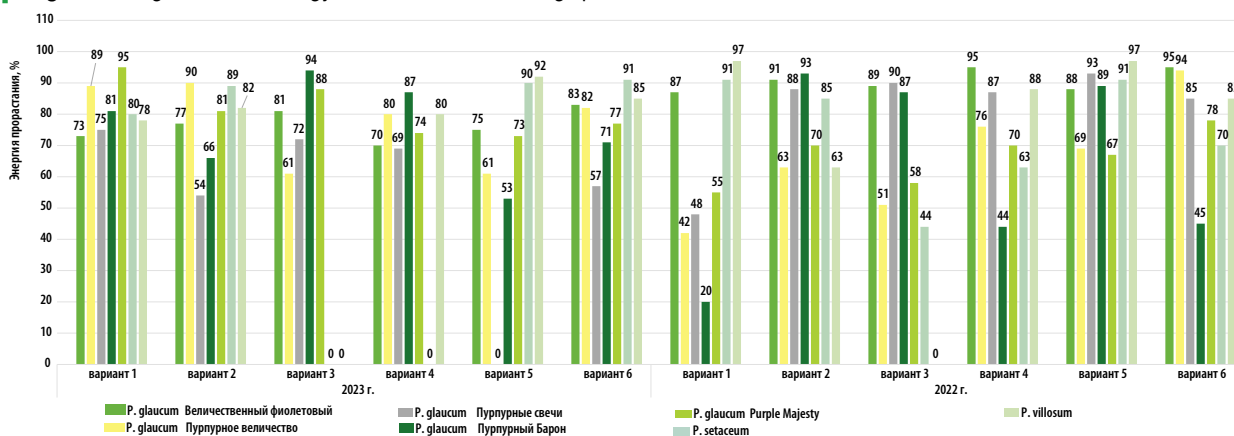
Применение Бона Форте Эликсир (вариант 4) на семенах 2023 г. с более коротким и длительным сроком хранения дало положительный результат у всех изучаемых сортов *P. glaucum*. Показатели всхожести у семян с периодом хранения 24 мес. оказались достаточно высокими и варьировали от 85% до 98%, превышая контрольные показатели на 2–13%. У семян *P. glaucum* 2022 г. сбора с таким же длительным периодом хранения всхожесть выше, чем в контроле (табл. 2). Только у видов *P. setaceum* и *P. villosum* зафиксировано снижение показателей на 10–23%. Замачивание в воде для этих видов оказалось более эффективным, чем в растворе ростостимулятора.

Сравнительный анализ показателей всхожести культиваров двух разных годов сбора с периодом хранения 24 мес. показал, что лабораторная всхожесть семян 2023 г. при замачивании их в растворе Бона Форте Эликсир выше показателей 2022 г. на 2–51%. (табл. 2)

В 5 варианте опыта с применением раствора Хлореллы показатели всхожести и энергии прорастания свыше 70% отмечены у сорта «Величественный фиолетовый» и вида *P. setaceum* 2023 г. (хранение 6 мес.) (табл. 2, рис. 1). Низкие показатели (менее 20%), по сравнению с другими сортами *P. glaucum*, были у сорта «Пурпурные свечи» (рис. 1, табл. 2). У сортов «Purple Majesty», «Пурпурный Барон», «Пурпурное величество» при сроке хранения семян 24 мес. выявлено резкое падение энергии прорастания на 22–28%, по сравнению контролем (рис. 2). Незначительное увеличение показателей (на 2%) отмечено лишь у сорта «Величественный фиолетовый».

Рис. 2 Энергия прорастания семян 2022–2023 гг. с периодом хранения 24 мес.

Fig. 2. Seed germination energy 2022–2023 with a storage period of 24 months.



Отмечено положительное влияние стимулятора *Хлорелла* на прорастание семян (табл. 2) у всех исследуемых культиваров 2022 г. сбора. Однако, всхожесть свыше 90% была выявлена у сорта «Пурпурные свечи» и видов: *P. setaceum*, *P. villosum*. Несмотря на высокие показатели у *P. setaceum* и *P. villosum*, полученные значения всхожести оказались ниже контрольных на 2–4% (табл. 2). Энергия прорастания и всхожесть у *P. setaceum* одинакова (91%) и равна значениям энергии прорастания в контрольном варианте опыта.

Самый высокий показатель лабораторной всхожести (свыше 80%) при использовании препарата *Биогумат+9* (вариант 6) среди всех изученных культиваров 2023 г. со сроком хранения 6 мес. был у *P. villosum* и *P. setaceum* (табл. 2). Низкая лабораторная всхожесть и энергия прорастания отмечены у сортов «Пурпурные свечи» 2023 г. (период хранения 6 мес.), «Пурпурный Барон» 2022 г. по сравнению с другими сортами (рис. 1–2, табл. 2). Также выявлено снижение показателей лабораторной всхожести семян у сорта «Величественный фиолетовый» 2023 г. (хранение 6 мес.) в 1,5 раза, а у семян с длительным хранением увеличение показателей до 89%, по сравнению с другими вариантами предпосевной обработки (табл. 2). У длительно хранящихся семян сорта «Purple Majesty» 2023 г. всхожесть меньше на 7%, а семян 2022 г. — выше на 18% по сравнению с контрольной группой.

При обработке раствором *Биогумат+9* семян *P. villosum* 2022 г. и 2023 г. (6 мес. хранения) показатели всхожести равны и составляют 87%, энергия прорастания варьирует от 61 до 85% (рис. 1–2, табл. 2). Самые высокие показатели всхожести (95–97%) и энергии прорастания (89–91%) отмечены у семян *P. setaceum* 2023 г. (6/24 мес. хранения). Всхожесть семян *P. villosum* и *P. setaceum* 2023 г. с более длительным периодом хранения оказалась выше, чем при хранении 6 мес. У семян *P. setaceum* 2022 г. значения всхожести меньше, чем в контроле на 10%.

В ходе лабораторного опыта выявлено, что у сорта «Величественный фиолетовый» семена 2022 г. показали лучшую всхожесть во всех вариантах опыта, чем семена 2023 г. с таким же периодом хранения. По сравнению с другими препаратами *Биогумат+9* оказался малоэффективным на семенах 2023 г. со сроком хранения 6 мес. Всхожесть ниже контрольных значений на 20%. На всхожесть семян сорта «Пурпурный Барон» 2023 г. (6 мес. хранения) незначительное влияние оказали все изученные препараты. Для семян со сроком 24 мес. хранения самым эффективным были *НВ-101*, *Бона Форте Эликсир*, *Биогумат+9*. На семенах сорта «Пурпурное величество» 2023 г. (24 мес. хранения) *НВ-101* оказался менее эффективным, чем остальные препараты. У семян 2022 г. всхожесть в опытных группах с применением стимуляторов роста выше, чем в контроле. Максимальные значения

(95%) отмечены при обработке раствором *Биогумат+9*. Всхожесть семян 2023 г. со сроком хранения 24 мес. у сорта «Пурпурные свечи» при обработке семян *НВ-101* сохранилась на уровне контроля (80%). Наилучшие значения всхожести, по сравнению с другими препаратами, выявлены при использовании *Бона Форте Эликсир*. Для семян 2022 г. все варианты с применением стимуляторов роста оказались эффективными. Благоприятное влияние на семена «Purple Majesty» 2022–2023 гг. сбора одного срока хранения оказали все исследуемые препараты. Увеличение всхожести от 72% до 98%. На семена 6 мес. хранения препарат — *Бона Форте Эликсир* (показатели выше, чем в других вариантах). У семян *P. villosum* 2023 г. (хранение 24 мес.) всхожесть при обработке семян стимуляторами роста была выше, по сравнению со значениями 2022 г. Положительное влияние на прорастание семян отмечено в контроле и с использованием *Эпин-Экстра*, *Бона Форте Эликсир*, *Хлорелла* и *Биогумат+9*. Для *P. setaceum* малоэффективными были препараты *НВ-101* и *Бона Форте Эликсир*.

Выводы/Conclusion

1. Длительное хранение семян (свыше 24 мес.) при положительно низкой температуре (+5 °C) и обработка их стимуляторами роста дают возможность получить всхожесть свыше 80% у изучаемых культиваров.

2. Увеличение показателей всхожести (от 85% до 97%) на семена *P. setaceum* 2022–2023 гг. оказали препараты: *Биогумат+9*, *Хлорелла*, *Эпин-Экстра*. Препараты продемонстрировали достоверную эффективность по сравнению с контролем.

3. Все исследуемые препараты оказывают положительное влияние на лабораторную всхожесть семян у вида *P. villosum* независимо от срока хранения и года сбора. Для получения лабораторной всхожести свыше 80% у семян 6 мес. хранения рекомендуем использовать препараты *Бона Форте Эликсир* и *Биогумат+9*.

4. У длительно хранящихся семян всех изученных культиваров 2023 г. показатели всхожести в контрольном варианте опыта выше на 22–60%, по сравнению с семенами короткого периода хранения.

5. Повышение величины показателя лабораторной всхожести, по сравнению с контролем, у сортов *P. glaucum* 2022 г. отмечено во всех вариантах. Рост показателя составил от 2% до 72%, что подтверждает эффективность препаратов для данных растений. У семян 2023 г. отмечено как повышение, так и уменьшение значений. Это может быть обусловлено сортовыми особенностями культиваров *P. glaucum*. Для получения высоких показателей для данной группы растений необходима предпосевная обработка семян ростостимуляторами.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ 1021060207393-6-1.6.11) Амурского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанического сада-института Дальневосточного отделения Российской академии наук

FUNDING

This study was supported by the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project (No. 1021060207393-6-1.6.11) of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коротков А.А., Кох Ж.А. Исследования влияния ростостимулирующих веществ на прорастание семян хвойных растений. *Хвойные boreальной зоны*. 2023; 41(6): 541–545. EDN VJSAOM
2. Атакова Е.А., Шишина А.С. Изучение влияния удобрений и регуляторов роста на особенности формирования урожайности семян сои в условиях Самарского Заволжья. *Аграрный научный журнал*. 2023; (2): 4–10. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp4-10>
3. Горбунова С.В., Сеньков А.О., Файзулин Д.Х. Опыт применения гуминового препарата при выращивании сеянцев хвойных пород с закрытой корневой системой в условиях Архангельской области. *Сибирский лесной журнал*. 2022; (1): 41–51. <https://doi.org/10.15372/SJFS20220104>
4. Мазыкина Е.А., Козлова И.В., Брагина О.А. Влияние предпосевной обработки семян фасоли обыкновенной регуляторами роста на их лабораторную всхожесть. *Рисоводство*. 2024; 23(3): 60–67. <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2024-64-3-60-67>
5. Рябчикова Н.Б., Шапошников Д.С., Надеждин С.М. Влияние регуляторов роста и водорастворимых удобрений на лабораторную и полевую всхожесть семян тыквы крупноплодной и мускатной. *Овощи России*. 2023; (4): 92–96. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-4-92-96>
6. Kaya A., Mutushev A., Lesova Z., Akhmetova A., Rysbayeva Y., Tauanov Z. Extraction of Plant Growth Regulators and Their Impact on the Growth Processes of Cereal Crops. *ES Food and Agroforestry*. 2025; 19: 1423. <https://doi.org/10.30919/faf1423>
7. Гричик Е.Л., Жолобова О.О. Влияние стимуляторов роста на лабораторную всхожесть семян и развитие всходов двух видов *Cytisus*. *Научно-агрономический журнал*. 2023; (1): 46–52. <https://doi.org/10.34736/FNC.2023.120.1.007.46-52>
8. Воронкова Н.А., Балабанова Н.Ф., Волкова В.А., Цыганова Н.А., Пахотина И.В. Применение ростостимуляторов при возделывании яровой мягкой пшеницы. *Достижения науки и техники АПК*. 2020; 34(10): 73–77. EDN RRPXSH
9. Chakraborti S., Bera K., Sadhukhan S., Dutta P. Bio-priming of seeds: Plant stress management and its underlying cellular, biochemical and molecular mechanisms. *Plant Stress*. 2022; 3: 100052. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100052>
10. Paul S., Dey S., Kundu R. Seed priming: an emerging tool towards sustainable agriculture. *Plant Growth Regulation*. 2022; 97(2): 215–234. <https://doi.org/10.1007/s10725-021-00761-1>
11. Khalid F. et al. Plant Biostimulants: Mechanisms and Applications for Enhancing Plant Resilience to Abiotic Stresses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024; 24(4): 6641–6690. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01996-3>
12. Šerá B., Doshi P., Věchet L. Influence of different stimulants on wheat (*Triticum aestivum* L.) grain in relation to the germination and early growth. *The Science of Nature*. 2025; 112(5): 69. <https://doi.org/10.1007/s00114-025-02020-z>
13. Singh N., Maurya V., Gupta K., Sharma I., Sharma A., Kumar R. Salt stress and its eco-friendly management using biostimulants in grain legumes: a review. *Discover Agriculture*. 2025; 3: 13. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00150-y>
14. Dubey R., Misra S. Biostimulants: an eco-friendly regulator of plant stress tolerance and sustainable solution to future agriculture. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2025; 91(1): 60–67. <https://doi.org/10.1007/s43538-024-00328-4>
15. Chabili A., Minaoui F., Hakkoum Z., Douma M., Meddich A., Loudiki M. Effects of extraction methods on the plant biostimulant activity of the soil microalga *Chlorella vulgaris*. *Journal of Applied Phycology*. 2024; 36(6): 3301–3314. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03328-5>

REFERENCES

1. Korotkov A.A., Kokh Zh.A. Study of the effect of growth-stimulating substances on germination of conifer seeds. *Conifers of the boreal area*. 2023; 41(6): 541–545 (in Russian). EDN VJSAOM
2. Atakova E.A., Shishina A.S. The study of the influence of fertilizers and growth regulators on the peculiarities of the formation of soybean seed yield in the conditions of the Samara Volga region. *Agrarian Scientific Journal*. 2023; (2): 4–10 (in Russian). <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp4-10>
3. Gorbunova S.V., Sen'kov A.O., Fayzulin D.H. The experience of using a humic preparation for growing coniferous ball-rooted seedlings in the conditions of Arkhangelsk Oblast. *Siberian journal of forest science*. 2022; (1): 41–51 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20220104>
4. Mazykina E.A., Kozlova I.V., Bragina O.A. Influence of pre-sowing treatment of common bean seeds with growth regulators on their laboratory germination. *Rice growing*. 2024; 23(3): 60–67 (in Russian). <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2024-64-3-60-67>
5. Ryabchikova N.B., Shaposhnikov D.S., Nadezhdkin S. M. The effect of growth regulators and water-soluble fertilizers on laboratory and field germination of large-fruited and nutmeg pumpkin seeds. *Vegetable crops of Russia*. 2023; (4): 92–96 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-4-92-96>
6. Kaya A., Mutushev A., Lesova Z., Akhmetova A., Rysbayeva Y., Tauanov Z. Extraction of Plant Growth Regulators and Their Impact on the Growth Processes of Cereal Crops. *ES Food and Agroforestry*. 2025; 19: 1423. <https://doi.org/10.30919/faf1423>
7. Grichik E.L., Zholobova O.O. The Effect of Growth Stimulants on the Laboratory Germination of Seeds and Two Types of *Cytisus* Seedlings Development. *Scientific Agronomy Journal*. 2023; (1): 46–52 (in Russian). <https://doi.org/10.34736/FNC.2023.120.1.007.46-52>
8. Voronkova N.A., Balabanova N.F., Volkova V.A., Tsyganova N.A., Pakhotina I.V. Application of growth stimulants in the cultivation of spring common wheat. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2020; 34(10): 73–77 (in Russian). EDN RRPXSH
9. Chakraborti S., Bera K., Sadhukhan S., Dutta P. Bio-priming of seeds: Plant stress management and its underlying cellular, biochemical and molecular mechanisms. *Plant Stress*. 2022; 3: 100052. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100052>
10. Paul S., Dey S., Kundu R. Seed priming: an emerging tool towards sustainable agriculture. *Plant Growth Regulation*. 2022; 97(2): 215–234. <https://doi.org/10.1007/s10725-021-00761-1>
11. Khalid F. et al. Plant Biostimulants: Mechanisms and Applications for Enhancing Plant Resilience to Abiotic Stresses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024; 24(4): 6641–6690. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01996-3>
12. Šerá B., Doshi P., Věchet L. Influence of different stimulants on wheat (*Triticum aestivum* L.) grain in relation to the germination and early growth. *The Science of Nature*. 2025; 112(5): 69. <https://doi.org/10.1007/s00114-025-02020-z>
13. Singh N., Maurya V., Gupta K., Sharma I., Sharma A., Kumar R. Salt stress and its eco-friendly management using biostimulants in grain legumes: a review. *Discover Agriculture*. 2025; 3: 13. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00150-y>
14. Dubey R., Misra S. Biostimulants: an eco-friendly regulator of plant stress tolerance and sustainable solution to future agriculture. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2025; 91(1): 60–67. <https://doi.org/10.1007/s43538-024-00328-4>
15. Chabili A., Minaoui F., Hakkoum Z., Douma M., Meddich A., Loudiki M. Effects of extraction methods on the plant biostimulant activity of the soil microalga *Chlorella vulgaris*. *Journal of Applied Phycology*. 2024; 36(6): 3301–3314. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03328-5>

16. Иванова А.Ю. Лабораторная всхожесть и энергия прорастания семян видов и сортов рода *Pennisetum Rich.* *Аграрная наука.* 2025; (3): 104–109.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-104-109>

17. Лутай С.С. Влияние биологически активных добавок на всхожесть семян. *Леса России и хозяйство в них.* 2025; (2): 70–77.

<https://doi.org/10.51318/FRET.2025.93.2.008>

18. Феоктистова Н.А. Сроки хранения семян многолетних трав для селекционных питомников. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2023; 184(2): 76–86.

<https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-2-76-86>

16. Ivanova A.Yu. Laboratory germination and seed vigor of species and varieties of the genus *Pennisetum Rich.* *Agrarian science.* 2025; (3): 104–109 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-104-109>

17. Lutai S.S. Influence of biologically active additives on seed germination. *Forests of Russia and economy in them.* 2025; (2): 70–77 (in Russian).

<https://doi.org/10.51318/FRET.2025.93.2.008>

18. Feoktistova N.A. Storage life for seeds of perennial grasses for breeding nurseries. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding.* 2023; 184(2): 76–86 (in Russian).

<https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-2-76-86>

ОБ АВТОРАХ

Анна Юрьевна Иванова

младший научный сотрудник лаборатории интродукции
Anya1-88@mail.ru

Елена Васильевна Лесик

кандидат биологических наук, научный сотрудник
лаборатории ботаники и защиты растений
stork-e@yandex.ru

Амурский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанического сада-института Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Игнатьевское шоссе 2-й км, Благовещенск, Амурская область, 67500, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Anna Yurievna Ivanova

junior researcher
Anya1-88@mail.ru

Elena Vasilievna Lesik

Candidate of Biological Sciences,
researcher
stork-e@yandex.ru

Amur branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
2nd km Ignatievskoye road, Blagoveshchensk 675000, Russia

ПРО ЯБЛОКО

ЗДЕСЬ ФОРМИРУЕТСЯ БУДУЩЕЕ
РОССИЙСКОГО САДОВОДСТВА

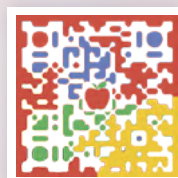
9-11 июня 2026

МВЦ «МинводыЭКСПО»

ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПОДРОБНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ
О ВЫСТАВКЕ >



А.С. Иванисова ✉

Д.М. Марченко

М.М. Иванисов

С.В. Подгорный

Н.С. Кравченко

Аграрный научный центр «Донской»,
Зерноград, Ростовская обл., Россия

✉ kameneva.anka2016@yandex.ru

Поступила в редакцию: 08.12.2025

Одобрена после рецензирования: 11.02.2026

Принята к публикации: 25.02.2026

© Иванисова А.С., Марченко Д.М.,
Иванисов М.М., Подгорный С.В.,
Кравченко Н.С.

Anna S. Ivanisova ✉

Dmitry M. Marchenko

Mikhail M. Ivanisov

Sergey V. Podgorny

Nina S. Kravchenko

Agricultural Research Center
“Donskoy”, Zernograd, Rostov region,
Russia

✉ kameneva.anka2016@yandex.ru

Received by the editorial office: 08.12.2025

Accepted in revised: 11.02.2026

Accepted for publication: 25.02.2026

© Ivanisova A.S., Marchenko D.M.,
Ivanisov M.M., Podgorny S.V.,
Kravchenko N.S.

Основные показатели качества зерна перспективных линий озимой твердой пшеницы

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В настоящее время главной задачей селекции озимой твердой пшеницы в Ростовской области является создание для засушливых районов сортов, не уступающих по урожайности сортам мягкой пшеницы, с высокой стабильностью качества зерна. *Целью исследований* стало проведение сравнительной характеристики линий озимой твердой пшеницы для выявления лучших по показателям качества зерна.

Методы. Исследования проводились в 2023–2025 гг. на опытных участках отдела селекции и семеноводства озимой пшеницы ФГБНУ АНЦ «Донской». В опыте изучалось 44 перспективных линии озимой твердой пшеницы.

Результаты. Анализ коэффициента вариации показал, что все изучаемые показатели качества в исследованиях характеризовались слабой изменчивостью ($C_v < 10,0\%$). По содержанию белка основная масса образцов соответствовала I классу качества зерна ($> 13,5\%$), линии 1354/20 и 529/21 — II классу (12,5–13,49%). Высокое содержание клейковины, соответствующее I классу ($> 28,0\%$), отмечено у 9 изучаемых линий. По стекловидности, согласно ГОСТ на твердую пшеницу, I классу качества зерна соответствовало 5 образцов ($> 85\%$). Высокое содержание каротиноидных пигментов, превышающее стандартный сорт Кристелла (508 мкг/%, $НСР_{05} = 34,7$ мкг/%), отмечено у 9 изучаемых линий.

По результатам изучения качества зерна выделен ряд линий озимой твердой пшеницы, согласно ГОСТ соответствующий I и II классам качества зерна: 216/21, 529/21, 732/21, 298/21, 336/21. Широкое использование их в селекционном процессе позволит получить новые урожайные сорта с высокими качественными показателями, пригодные для макаронно-крупяной промышленности.

Ключевые слова: озимая твердая пшеница, перспективная линия, качество зерна, селекционный процесс, исходный материал

Для цитирования: Иванисова А.С., Марченко Д.М., Иванисов М.М., Подгорный С.В., Кравченко Н.С. Основные показатели качества зерна перспективных линий озимой твердой пшеницы. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 80–85. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-80-85>

Main grain quality indicators of promising winter durum wheat lines

ABSTRACT

Relevance. Currently, the main aim of winter durum wheat breeding in the Rostov Region is to develop varieties for arid regions that are comparable in productivity to common wheat varieties and have highly stable grain quality. In this regard, the purpose of the current study was to carry out a comparative analysis of winter durum wheat lines to identify the best ones in terms of grain quality indicators.

Methods. The study was conducted on experimental plots of the winter wheat breeding and seed production department of the FSBSI ARC “Donskoy” in 2023–2025. There have been studied 44 promising winter durum wheat lines in the trials.

Results. The analysis of the coefficient of variation has shown that all quality indicators studied in our trials were characterized by low variability ($C_v < 10.0\%$). Based on protein percentage, most samples corresponded to the 1st grain quality class ($> 13.5\%$), while the lines 1354/20 and 529/21 corresponded to the 2nd class (12.5–13.49%). High gluten content, corresponding to the 1st class ($> 28.0\%$), was established in nine studied lines. According to the GOST standard for durum wheat, grain hardness of five samples ($> 85\%$) met the 1st grain quality class. High carotenoid pigment content, exceeding the standard variety Kristella (508 $\mu\text{g}/\%$, $HSR_{05} = 34.7$ $\mu\text{g}/\%$), was determined in nine studied lines. Based on the study of grain quality, there have been identified several winter durum wheat lines 216/21, 529/21, 732/21, 298/21, and 336/21 that meet GOST standards for the 1st and 2nd grain quality classes. Their widespread use in breeding will enable the development of new, highly productive, high-qualitative varieties suitable for the pasta and cereal industry.

Key words: winter durum wheat, promising line, grain quality, breeding process, initial material

For citation: Ivanisova A.S., Marchenko D.M., Ivanisov M.M., Podgorny S.V., Kravchenko N.S. Main grain quality indicators of promising winter durum wheat lines. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 80–85 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-80-85>

Введение/Introduction

Реальная ценность сельскохозяйственной продукции во многом определяется ее качеством. Особое значение имеет повышение качества зерна — основного продукта сельскохозяйственного производства [1, 2].

В настоящее время в Ростовской области главной задачей селекции озимой твердой пшеницы является создание для засушливых районов сортов, не уступающих по урожайности сортам мягкой пшеницы, с высокой стабильностью качества зерна [2, 3].

Ценность твердой пшеницы определяется ее химическим составом, технологическими и пищевыми достоинствами. Эти свойства связаны с особенностями сорта и условиями выращивания. Внедрение в производство новых, наиболее продуктивных и ценных по качеству сортов твердых пшениц — важное условие повышения эффективности сельского хозяйства [4, 5].

Проблема качества озимой твердой пшеницы, как и вопрос о факторах, под воздействием которых оно формируется, интересует селекционеров, создающих новые сорта, и фермеров, выращивающих ее, и специалистов перерабатывающей промышленности [6, 7].

К качеству зерна твердой пшеницы предъявляются очень высокие требования. Необходимо, чтобы зерно было крупным, стекловидным, с высоким натурным весом и имело хорошие макаронно-крупяные качества. Поэтому во всех зонах страны, в каком бы направлении ни велась селекционная работа, она должна обязательно сопровождаться соответствующей оценкой качества зерна селекционного материала [8, 9].

В связи с этим *целью исследований* стало проведение сравнительной характеристики линий озимой твердой пшеницы для выявления лучших по показателям качества зерна.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводились в 2023–2025 гг. на опытных участках отдела селекции и семеноводства озимой пшеницы ФГБНУ АНЦ «Донской» (Россия).

В опыте изучалось 44 перспективных линии озимой твердой пшеницы: 709/16, 971/19, 1147/19, 1174/19, 555/20, 691/20, 1093/20, 1354/20, 1377/20, 216/21, 265/21, 278/21, 398/21, 436/21, 496/21, 529/21, 617/21, 654/21, 732/21, 387/20, 617/20, 1382/20, 1384/20, 64/21, 165/21, 248/21, 298/21, 491/21, 8/22, 78/22, 109/22, 126/22, 127/22, 154/22, 215/22, 246/22, 269/22, 336/22, 415/22, 457/22, 482/22, 492/22, 711/22, 730/22.

В качестве стандарта использовали сорт Кристелла (стандарт на сортоучастках Ростовской области).

Посев проводили сеялкой Wintersteiger Plotseed S (Австрия) рядовым способом, с нормой высева 500 всхожих зерен на 1 м². Площадь делянок — 10 м², повторность — шестикратная. Предшественник — сидеральный пар.

Качество зерна у линий озимой твердой пшеницы определяли: количество клейковины — ГОСТ Р 54478-2011¹, натура зерна — ГОСТ 10840-2017², содержание белка — ГОСТ 10846-91³, стекловидность — ГОСТ Р 70629-2023⁴, содержание каротиноидов — колOMETрическим методом⁵, индекс цветности измеряли с помощью колориметра Konica Minolta CR-410 (Япония)⁶.

Годы проведения опытов различались по погодным условиям: выпавшие в период налива и созревания зерна (май–июнь) 2023 года осадки привели к получению урожая с низким качеством зерна твердой пшеницы. Условия 2024 года были засушливыми, частые суховеи в период цветения и налива зерна повлияли на сроки уборки, она началась раньше среднепогодных, но несмотря на это, удалось получить достаточно высокий урожай озимой твердой пшеницы с хорошим качеством зерна. 2025 год характеризовался как острозасушливый с незначительным выпадением атмосферных осадков (228,9 мм осадков, 40% от среднепогодной) и низкой относительной влажностью воздуха в отдельные важные для развития растений периоды. Температурный режим летнего периода был весьма неустойчивым: частые и интенсивные осадки, сопровождающиеся усилением ветра в начале июня 107,0 мм (150,1% от среднепогодной) оказали неблагоприятное воздействие на налив зерна озимой пшеницы, что привело к недобору урожая, но не оказало значительного влияния на качество⁷.

Математическая обработка экспериментального материала проводилась с помощью специальных программ Microsoft Office Excel, Статистика 10.0 (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Наряду с увеличением общего объема производства зерна большое народно-хозяйственное значение имеет улучшение его качества [9].

Анализ коэффициента вариации показал, что все изучаемые показатели качества в наших исследованиях характеризовались слабой изменчивостью по годам ($C_v < 7,0\%$) (таблица 1).

Содержание белка по-прежнему является основным показателем качества продукции,

¹ ГОСТ Р 54478-2011 Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице.

² ГОСТ 10840-2017 Зерно. Метод определения натуры.

³ ГОСТ 10846-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка.

⁴ ГОСТ Р 70629-2023 Пшеница. Определение стекловидности опико-компьютерным методом.

⁵ ГОСТ Р 54058-2010 Продукты пищевые функциональные. Метод определения каротиноидов.

⁶ ГОСТ 32197-2013 Изделия макаронные. Методы определения цвета и потемнения на трехкоординатном колориметре.

⁷ <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34735.htm>

Таблица 1. Изменчивость показателей качества зерна перспективных линий озимой твердой пшеницы, 2023–2025 гг.

Table 1. Variability of grain quality indicators of promising winter durum wheat lines, 2023–2025.

Показатель	Min-max среднее	Коэффициент вариации (CV), %
Урожайность, т/га	7,30–10,27 8,72	7,29
Содержание белка, %	13,33–15,14 14,16	3,16
Содержание клейковины, %	24,5–29,3 26,9	4,17
Содержание каротиноидов, %	442–599 522	6,64
Стекловидность, %	74–87 81	3,80
Натура зерна, г/л	752–828 794	1,92
Цветность зерна, е.п.	24,78–27,44 26,08	2,75

которому уделяется большое внимание при создании новых сортов пшеницы [10].

Данный показатель за изучаемый период варьировал в широких пределах от 13,33% до 15,14%, при среднем значении 14,16%, у стандартного сорта Кристелла — 14,44% (рисунок 1).

Основная масса образцов (95,5%) озимой твердой пшеницы по содержанию белка соответствовала I классу качества зерна (> 13,5%), линии 1354/20 и 529/21 — II классу (12,5–13,49%).

Для производства хороших макаронных изделий большое значение имеет содержание в зерне клейковины [11].

В среднем за 2023–2025 гг. содержание клейковины у изучаемых образцов варьировало от 24,5% до 29,3%, при средней величине 26,9%, у стандарта — 28,3% (рисунок 2).

Основная их часть (77,8%) по данному признаку соответствовала II классу качества зерна. Высокое содержание клейковины, соответствующее I классу (> 28,0%), отмечено у 9 изучаемых линий: 436/21, 496/21, 654/21, 387/20, 1384/20, 64/21, 165/21, 248/21, 127/22.

Технологические требования, предъявляемые к сортам твердых пшениц при заготовках, помимо характеристики зерна по содержанию клейковины, предусматривают определение общей его стекловидности [12].

Стекловидность зерна перспективных линий варьировала от 74% до 87%, при среднем значении 81%, у стандарта — 84% (рисунок 3).

Согласно ГОСТ на твердую пшеницу⁸, за изучаемый период, I классу качества зерна соответствовало 5 образцов (> 85%): 216/21, 529/21, 732/21, 298/21, 336/22.

Натура зерна, как и стекловидность, лежит в основе товарной классификации зерна. В наших исследованиях показатели данного признака находились в пределах 752–828 г/л, при средней выборке 794 г/л, у стандартного сорта — 774 г/л. Все

Рис. 1. Распределение образцов озимой твердой пшеницы по содержанию белка, 2023–2025 гг.

Fig. 1. Distribution of winter durum wheat samples according to protein percentage, 2023–2025.

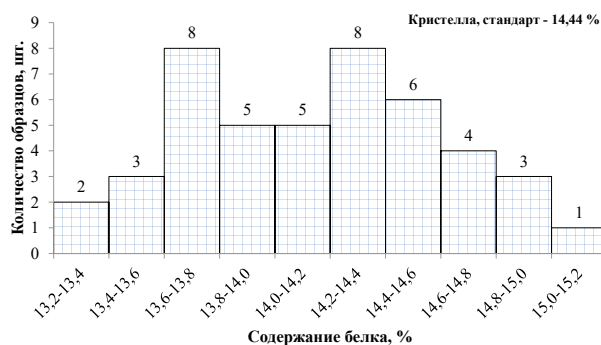


Рис. 2. Распределение образцов озимой твердой пшеницы по содержанию клейковины, 2023–2025 гг.

Fig. 2. Distribution of winter durum wheat samples according to gluten content, 2023–2025.

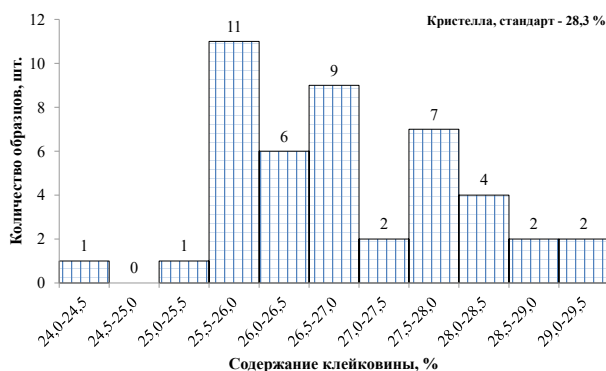
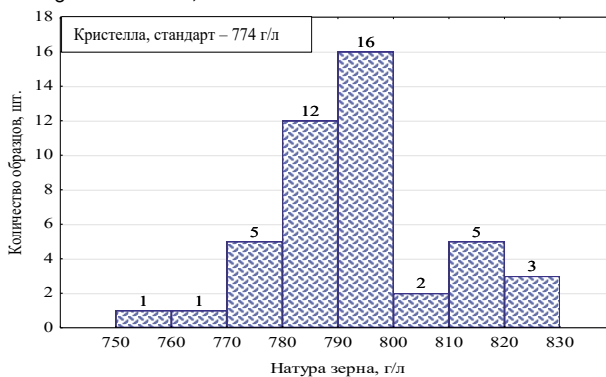


Рис. 3. Распределение образцов озимой твердой пшеницы по стекловидности, 2023–2025 гг.

Fig. 3. Distribution of winter durum wheat samples according to grain hardness, 2023–2025.



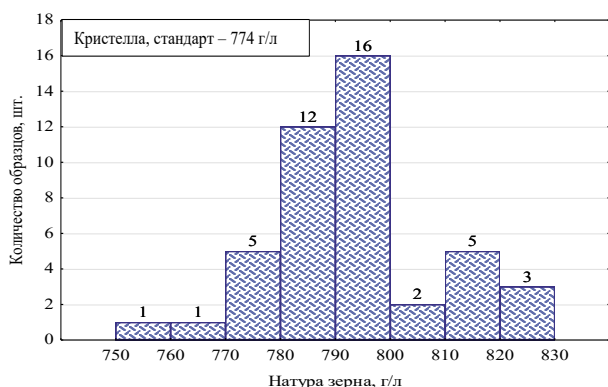
изучаемые образцы озимой твердой пшеницы по натуре зерна соответствовали I классу качества зерна (> 770 г/л), за исключением линий 971/19 и 398/21, которые соответствовали II классу качества (рисунок 4).

Отличительным свойством твердых пшениц является уровень содержания каротиноидных пигментов, вдвое превышающий уровень их содержания в мягких пшеницах [13]. В селекционной практике по данному признаку ведется постоянный отбор и образцы с уровнем ниже 400 мкг/% выбраковываются.

⁸ ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2019; 11

Рис. 4. Распределение образцов озимой твердой пшеницы по натуре зерна, 2023–2025 гг.

Fig. 4. Distribution of winter durum wheat samples according to grain unit, 2023–2025.



Так содержание каротиноидов у образцов озимой твердой пшеницы в опыте находилось в пределах 442–599 мкг/%, при среднем значении 522 мкг/% (рисунок 5).

Высокие показатели по данному признаку, превышающие стандартный сорт Кристалла (508 мкг/%, НСР₀₅ = 34,7 мкг/%), отмечены у 9 изучаемых линии: 64/24 (547 мкг/%), 336/22 (548 мкг/%), 78/22 (550 мкг/%), 617/20 (557 мкг/%), 246/22 (559 мкг/%), 109/22 (578 мкг/%), 165/21 (585 мкг/%), 8/22 (587 мкг/%), 269/22 (599 мкг/%).

Цветность зерна линий озимой твердой пшеницы варьировала от 24,78 до 27,44 единиц прибора колориметра Konica Minolta CR-410, при среднем значении выборки 26,08 е.п. Достоверное превышение над стандартом по данному признаку (24,78 е.п., НСР₀₅ = 0,72 е.п.) отмечено у 73,3% образцов (33 шт.): 1147/19, 1174/19, 387/20, 1382/20, 732/21 и др. (рисунок 6).

Образцы со значениями цветности зерна выше 26,0 е.п. представляют наибольший интерес для селекционной практики озимой твердой пшеницы.

По результатам корреляционного анализа были выявлены отрицательные взаимосвязи урожайности с содержанием белка ($r = -0,48 \pm 0,13$) и клейковины ($r = -0,30 \pm 0,15$). Между показателями качества отмечены тесные средние положительные взаимосвязи: содержание белка и клейковины

Рис. 5. Распределение образцов озимой твердой пшеницы по содержанию каротиноидов, 2023–2025 гг.

Fig. 5. Distribution of winter durum wheat samples according to carotenoid content, 2023–2025.

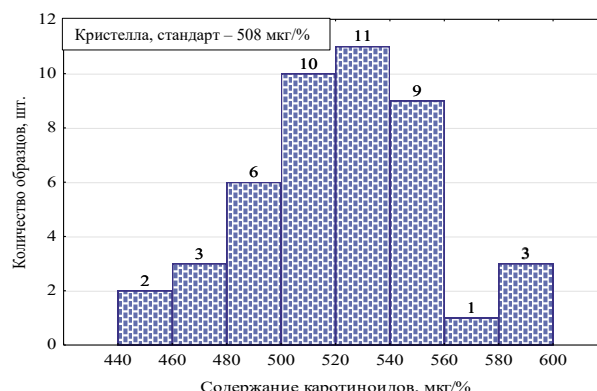
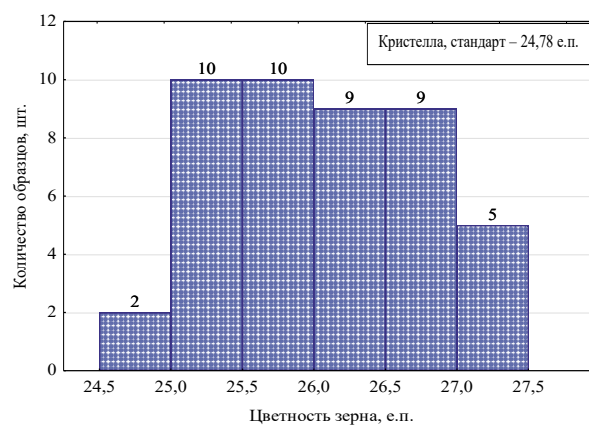


Рис. 6. Распределение образцов озимой твердой пшеницы по цветности зерна, 2023–2025 гг.

Fig. 6. Distribution of winter durum wheat samples according to grain color, 2023–2025.



($r = 0,76 \pm 0,10$), натура зерна и стекловидность ($r = 0,57 \pm 0,12$), цветность зерна и стекловидность ($r = 0,39 \pm 0,14$) (таблица 2).

Большая сложность при селекции заключается в необходимости сочетания в одном сорте большого числа ценных признаков и свойств [13–16].

По результатам изучения качества зерна выделен ряд линий озимой твердой пшеницы, согласно ГОСТ, соответствующему I и II классам качества

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между урожайностью и признаками качества зерна, 2023–2025 гг.

Table 2. Correlation coefficients between productivity and grain quality traits, 2023–2025.

Показатель	Урожайность, т/га	Содержание каротиноидов, %	Содержание белка, %	Содержание клейковины, %	Стекловидность, %	Натура зерна, г/л	Цветность зерна, е.п.
Урожайность, т/га	1,00	–	–	–	–	–	–
Содержание каротиноидов, %	–0,17	1,00	–	–	–	–	–
Содержание белка, %	–0,48*	0,02	1,00	–	–	–	–
Содержание клейковины, %	–0,30*	–0,12	0,76*	1,00	–	–	–
Стекловидность, %	–0,18	–0,18	0,16	0,19	1,00	–	–
Натура зерна, г/л	–0,26	–0,08	0,05	0,04	0,57*	1,00	–
Цветность зерна, е.п.	–0,01	–0,14	–0,09	–0,23	0,39*	0,12	1,00

Примечание: *отмеченные корреляции значимы на уровне $p < ,05000$

Таблица 3. Характеристика выделенных по комплексу качественных показателей образцов озимой твердой пшеницы, 2023–2025 гг.

Table 3. Characteristics of winter durum wheat samples identified according to a set of quality indicators, 2023–2025.

Образец	Урожайность, т/га	Содержание			Стекловидность, %	Натура, г/л	Цветность зерна, е.п.
		белка, %	клейковины, %	каротиноидов, мкг/%			
Кристелла, стандарт	8,62	14,44	28,3	508	84	774	24,78
216/21	9,19	13,64	26,5	508	87	797	26,79
529/21	9,04	13,36	25,7	526	86	818	26,10
732/21	9,16	14,28	27,9	482	86	797	27,33
298/21	7,84	14,83	27,9	483	85	823	25,12
336/22	8,27	14,18	27,9	548	85	798	26,43

зерна: 216/21, 529/21, 732/21, 298/21, 336/21. Их характеристика представлена в таблице 3.

Образцы озимой твердой пшеницы, формирующие зерно с высокими технологическими свойствами, представляют большой интерес для селекции на качество.

Выводы / Conclusions

По результатам трехлетней оценки (2023–2025 гг.) перспективных линий озимой твердой пшеницы в условиях Ростовской области отмечено, что все изучаемые показатели качества зерна характеризовались слабой изменчивостью по годам ($C_v < 7,0\%$).

В результате изучения выделены ценные по комплексу признаков образцы: содержание белка ($> 13,5\%$), клейковины ($> 28,0\%$), каротиноидов

(> 500 мкг%), стекловидности ($> 85\%$), натуры зерна (> 770 г/л), цветности ($> 25,0$ е.п.), которые можно использовать в качестве исходного материала при создании высококачественных сортов озимой твердой пшеницы.

Особого внимания заслуживают селекционные линии озимой твердой пшеницы: 216/21, 529/21, 732/21, 298/21, 336/21. Данные генотипы обладают комплексом ценных качественных характеристик, что делает их перспективными для дальнейших исследований. Внедрение выделенных линий в селекционный процесс может способствовать разработке новых высокоурожайных сортов озимой твердой пшеницы с отличными качественными показателями, что, в свою очередь, повысит их конкурентоспособность на рынке продукции для макаронно-крупяной промышленности.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ложкин А.Г., Дмитриев В.Л., Мальчиков П.Н. Сравнительная оценка сортов яровой твердой пшеницы в условиях Чувашской Республики. *Пермский аграрный вестник*. 2023; (3): 29–34. EDN OPIQOG
2. Некрасова О.А. и др. Результаты изучения селекционных линий озимой мягкой пшеницы в конкурсном сортоиспытании по урожайности и качеству зерна. *Зерновое хозяйство России*. 2019; (2): 32–37. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-62-2-32-37>
3. Резвякова С.В., Титов В.Н., Данилов С.Ю., Конеева О.А., Зайцев В.А. Урожайность и качество зерна новых сортов озимой пшеницы в условиях Орловской области. *Аграрная наука*. 2023; (2): 76–81. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-367-2-76-81>
4. Kroupin P.Yu. et al. Association of High-Molecular-Weight Glutenin Subunits with Grain and Pasta Quality in Spring Durum Wheat (*Triticum turgidum* spp. *durum* L.). *Agronomy*. 2023; 13(6): 1510. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061510>
5. Ivanisov M., Marchenko D., Romanyukina I., Chukhnenko Y., Kirin A. The Quality of Grain and Flour of Winter Soft Wheat in the Inter-Station Test. Zokirjon ugli K.S., Muratov A., Ignateva S. (eds.). *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022). Agricultural Cyber-Physical Systems. Conference proceedings*. Cham: Springer. 2024; 1: 1235–1241. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9_120
6. Подгорный С.В., Скрипка О.В., Самофалов А.П., Чернова В.Л., Кравченко Н.С. Новый адаптивный, высокопродуктивный сорт озимой мягкой пшеницы Василич, созданный в ФГБНУ «АНЦ «Донской». *Аграрная наука*. 2025; (6): 139–147. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-139-147>
7. Su W., Xu H., Sun L., Lu C., Wu R. Genetic diversity analysis of volunteer wheat based on SSR markers. *Journal of Genetics*. 2023; 102(2): 54. <https://doi.org/10.1007/s12041-023-01451-9>

REFERENCES

1. Lozhkin A.G., Dimitriev V.L., Malchikov P.N. Comparative assessment of spring durum wheat varieties in the conditions of the Chuvash Republic. *Perm Agrarian Journal*. 2023; (3): 29–34 (in Russian). EDN OPIQOG
2. Nekrasova O.A. et al. The study results of productivity and grain quality of the breeding lines of winter soft wheat in the competitive variety-testing. *Grain Economy of Russia*. 2019; (2): 32–37 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-62-2-32-37>
3. Rezvyakova S.V., Titov V.N., Danilov S.Yu., Koneeva O.A., Zaitsev V.A. Grain yield and quality of new winter wheat varieties in the Orel region. *Agrarian science*. 2023; (2): 76–81 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-367-2-76-81>
4. Kroupin P.Yu. et al. Association of High-Molecular-Weight Glutenin Subunits with Grain and Pasta Quality in Spring Durum Wheat (*Triticum turgidum* spp. *durum* L.). *Agronomy*. 2023; 13(6): 1510. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061510>
5. Ivanisov M., Marchenko D., Romanyukina I., Chukhnenko Y., Kirin A. The Quality of Grain and Flour of Winter Soft Wheat in the Inter-Station Test. Zokirjon ugli K.S., Muratov A., Ignateva S. (eds.). *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022). Agricultural Cyber-Physical Systems. Conference proceedings*. Cham: Springer. 2024; 1: 1235–1241. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37978-9_120
6. Podgorny S.V., Skripka O.V., Samofalov A.P., Chernova V.L., Kravchenko N.S. A new adaptive, highly productive variety of winter soft wheat Vasilich, created at the Federal State Budgetary Scientific Institution ANTS “Donskoy”. *Agrarian science*. 2025; (6): 139–147 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-139-147>
7. Su W., Xu H., Sun L., Lu C., Wu R. Genetic diversity analysis of volunteer wheat based on SSR markers. *Journal of Genetics*. 2023; 102(2): 54. <https://doi.org/10.1007/s12041-023-01451-9>

8. Hickey L.T. *et al.* Breeding crops to feed 10 billion. *Nature Biotechnology*. 2019; 37(7): 744–754. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0152-9>
9. Асхадуллин Д.Ф. и др. Качество сортов яровой мягкой пшеницы для изготовления хлеба из цельнозерновой муки. *Аграрная наука*. 2025; (9): 125–133. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-125-133>
10. Gultyaeva E. *et al.* Evaluation of resistance of spring durum wheat germplasm from Russia and Kazakhstan to fungal foliar pathogens. *Cereal Research Communications*. 2020; 48(1): 71–79. <https://doi.org/10.1007/s42976-019-00009-9>
11. Гончаров С.В., Курашов М.Ю. Перспективы развития российского рынка твердой пшеницы. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2018; (2): 66–75. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.2.66>
12. Sanders L.M., Zhu Y., Wilcox M.L., Koecher K., Maki K.C. Effects of Whole Grain Intake, Compared with Refined Grain, on Appetite and Energy Intake: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Advances in Nutrition*. 2021; 12(4): 1177–1195. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa178>
13. Ложкин А.Г., Васильев О.А., Димитриев В.Л., Каюкова О.В., Яковлева М.И. Особенности формирования урожайности и качества пшеницы твердой яровой в условиях Чувашской Республики. *Аграрная наука*. 2024; (2): 87–91. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-87-91>
14. Мудрова А.В., Шерстов А.С. Геномная селекция растений: новые возможности для ускорения селекционного процесса. *Актуальные вопросы современной селекции, генетики и биотехнологии: Сборник статей научно-практической конференции*. М.: ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. 2025; 131–133. EDN PMTDVI.
15. Мухина Я.В., Пугачева Н.С. Характеристика гибридов F1 яровой мягкой пшеницы по признакам продуктивности. *Константиновские чтения: Сборник научных трудов III международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников*. Кинель: Самарский государственный аграрный университет. 2025; 155–160. EDN WGDYJL.
16. Чухина О.В., Демидова А.И., Брилин А.К. Изучение элементов продуктивности в генетике и селекции пшеницы при применении скрещивания. *Передовые достижения науки в молочной отрасли: Сборник научных трудов по результатам работы VII Международной научно-практической конференции, посвящённой дню рождения Николая Васильевича Верещагина*. Вологда: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2025; 455–458. EDN KFFYIL.
8. Hickey L.T. *et al.* Breeding crops to feed 10 billion. *Nature Biotechnology*. 2019; 37(7): 744–754. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0152-9>
9. Askhadullin D.F. *et al.* The quality of spring common wheat varieties for making bread from whole grain flour. *Agrarian science*. 2025; (9): 125–133 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-125-133>
10. Gultyaeva E. *et al.* Evaluation of resistance of spring durum wheat germplasm from Russia and Kazakhstan to fungal foliar pathogens. *Cereal Research Communications*. 2020; 48(1): 71–79. <https://doi.org/10.1007/s42976-019-00009-9>
11. Goncharov S.V., Kurashov M.Yu. Prospects for the development of the Russian durum wheat market. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018; (2): 66–75 (in Russian). <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.2.66>
12. Sanders L.M., Zhu Y., Wilcox M.L., Koecher K., Maki K.C. Effects of Whole Grain Intake, Compared with Refined Grain, on Appetite and Energy Intake: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Advances in Nutrition*. 2021; 12(4): 1177–1195. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa178>
13. Lozhkin A.G., Vasiliev O.A., Dimitriev V.L., Kayukova O.V., Yakovleva M.I. Features of the formation of yield and quality of durum spring wheat in the conditions of the Chuvash Republic. *Agrarian science*. 2024; (2): 87–91 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-87-91>
14. Mudrova A.V., Sherstov A.S. Genomic Plant Breeding: New Opportunities for Accelerating the Breeding Process. *Current Issues in Modern Breeding, Genetics, and Biotechnology: Collection of Articles from the Scientific and Practical Conference*. Moscow: Timiryazev Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy. 2025; 131–133. (in Russian). EDN PMTDVI.
15. Mukhina Ya.V., Pugacheva N.S. Characteristics of F1 Spring Soft Wheat Hybrids Based on Productivity Traits. *Konstantinovsky Readings: Collection of Scientific Papers from the III International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates, Students, and Schoolchildren*. Kinel: Samara State Agrarian University. 2025; 155–160. (in Russian). EDN WGDYJL.
16. Chukhina, O.V., Demidova, A.I., and Briilin, A.K. Study of productivity elements in wheat genetics and breeding using crossbreeding. *Advanced scientific achievements in the dairy industry: Collection of scientific papers based on the results of the 7th International scientific and practical conference dedicated to the birthday of Nikolai V. Vereshchagin*. Vologda: Vologda State Dairy Academy, 2025; 455–458., 2025; 455–458. (in Russian). EDN KFFYIL.

ОБ АВТОРАХ

Анна Сергеевна Иванисова

кандидат сельскохозяйственных наук,
младший научный сотрудник
kameneva.anka2016@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1466-250X>

Дмитрий Михайлович Марченко

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник
<https://orcid.org/0000-0002-5251-3903>

Михаил Михайлович Иванисов

кандидат сельскохозяйственных наук,
старший научный сотрудник
ivanisov561991@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7395-0910>

Сергей Викторович Подгорный

кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник
podgorny128@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8438-1327>

Нина Станиславовна Кравченко

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
ninakravchenko78@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

Аграрный научный центр «Донской»,
Научный городок, 3, Зерноград, Ростовская обл., 347740,
Россия

ABOUT THE AUTHORS

Anna Sergeevna Ivanisova

Candidate of Agricultural Sciences,
junior researcher
kameneva.anka2016@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1466-250X>;

Dmitry Mikhailovich Marchenko

Candidate of Agricultural Sciences,
leading researcher
<https://orcid.org/0000-0002-5251-3903>

Mikhail Mikhailovich Ivanisov

Candidate of Agricultural Sciences,
senior researcher
ivanisov561991@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7395-0910>

Sergey Viktorovich Podgorny

Candidate of Agricultural Sciences,
leading researcher
podgorny128@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8438-1327>

Nina Stanislavovna Kravchenko

Candidate of Biological Sciences,
leading researcher
ninakravchenko78@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

Agricultural Research Center «Donskoy»,
3 Nauchny Gorodok, Zernograd, Rostov region, 347740,
Russia

Изучение площади листовой поверхности, содержания фотосинтетических пигментов в листьях и урожайности картофеля сорта Печорский на фоне различных доз минеральных удобрений

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Цель исследований заключалась в определении влияния различных доз минеральных удобрений на урожайность клубней картофеля и проведение качественного анализа листьев на содержание в них основных фотосинтетических пигментов.

Методы. Исследования проведены в период с 2023 по 2025 года в селекционных питомниках размножения. Объектами для изучения были сорт картофеля Печорский и полевой опыт, представленный в пяти вариантах в четырехкратной повторности: без применения минеральных удобрений, с половинной, полной, полудвойной и двойной дозах внесенных сложных комплексных гранулированных минеральных удобрений (нитроаммофоска) в качестве подкормки (30 г/м²) с отношением 16:16:16% д.в.

Результаты. В результате исследований доказана высокоинтенсивная отзывчивость картофеля сорта Печорский на внесение различных доз минеральных удобрений, что позволяет получить в опытных вариантах урожайность до 25,6–35,7 т/га, с высокими качественными характеристиками клубней (сухое вещество, крахмал), превышающих вариант без внесения удобрений. Отмечена тенденция к увеличению листового аппарата картофельных растений при внесении повышенных доз удобрений, что сказывается на процессе ассимиляции и, как следствие, может оказывать влияние на урожайность. Результат экономического анализа позволяет рекомендовать применение комплекса полных минеральных удобрений по схеме 1,5 NPK и 2,0 NPK, что обеспечивает получение продукции с высоким уровнем рентабельности в агроклиматических условиях Республики Коми.

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), сорт, урожайность, площадь листа, фотосинтетические пигменты, минеральные удобрения.

Для цитирования: Тулинов А.Г., Королева М.П. Изучение площади листовой поверхности, содержания фотосинтетических пигментов в листьях и урожайности картофеля сорта Печорский на фоне различных доз минеральных удобрений. *Аграрная наука*. 2026; 405(04): 86–93.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-86-93>

Study of leaf surface area, content of photosynthetic pigments in leaves and yield of Pechorsky potato variety under different doses of mineral fertilizers

ABSTRACT

Relevance. The objective of the study was to determine the effect of different rates of mineral fertilizers on tuber yield and to conduct a qualitative analysis of the leaves for their essential photosynthetic pigment content.

Methods. The study was conducted from 2023 to 2025 in breeding nurseries. The objects of study were the Pechorsky potato variety and a field experiment presented in five variants in fourfold replication: without the use of mineral fertilizers, with half, full, one and a half and double doses of applied complex granular mineral fertilizers (nitroammophoska) as top dressing (30 g/m²) with a ratio of 16:16:16% of the active substance.

Results. The research demonstrated the highly responsive nature of the Pechorsky potato variety to various doses of mineral fertilizers, enabling yields of up to 25.6–35.7 t/ha in experimental settings, with high-quality tuber characteristics (dry matter, starch), exceeding those of the unfertilized variety. A tendency toward increased foliar growth was noted with higher fertilizer doses, which affects the assimilation process and, consequently, may impact yield. The economic analysis recommends the use of a complete mineral fertilizer system with a 1.5 NPK and 2.0 NPK schedule, ensuring highly profitable production in the agroclimatic conditions of the Komi Republic.

Key words: potato (*Solanum tuberosum* L.), variety, yield, leaf area, photosynthetic pigments, mineral fertilizers.

For citation: Tulinov A.G., Koroleva M.P. Study of leaf surface area, content of photosynthetic pigments in leaves and yield of Pechorsky potato variety under different doses of mineral fertilizers. *Agrarian science*. 2026; 405(04): 86–93 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-86-93>

Введение/Introduction

Влияние сорта в формировании урожая картофеля может достигать до 70%, что говорит о его большой значимости при возделывании данной культуры¹. Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию, содержит сведения более чем о пятистах сортах картофеля и каждый год в него добавляются новые². Для Северного региона допущены в реестр и рекомендованы к выращиванию более пятидесяти сортов, один из которых, Печорский, выведен в 2025 году при непосредственном участии селекционеров Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Республика Коми, г. Сыктывкар) и Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха (Московская область, п.г.т. Коренево) [1, 2].

Новые перспективные сорта для республики должны обладать устойчивостью к био- и абиотическим факторам, экологической пластичностью и быть адаптированы к зональным условиям выращивания [3, 4]. При выведении новых сортов картофеля для региона необходимо учитывать комплекс факторов, складывающихся вследствие природно-климатических условий территории [5–8]. Агроклиматические особенности Республики Коми, такие как длинный световой день и «качество» света в период вегетации картофельных растений, достаточная влагообеспеченность при применении соответствующих агротехнических приемов, направленных на повышение плодородия почв, использование районированных сортов, способствуют получению качественного картофеля с достаточно высокой урожайностью.

Формирование урожая картофеля происходит вследствие сложных физиологических процессов. Сухая биомасса картофеля более чем на 90% является результатом фотосинтетической деятельности растений. Основной вклад в ассимиляцию вносят листья. Площадь листовой поверхности одного куста может достигать до 0,8–1,2 м² [9]. Урожайность культуры во многом зависит от скорости нарастания и размеров листовой поверхности. Кроме того, важно чтобы максимальная площадь листьев формировалась к началу клубнеобразования. Содержание в растениях фотосинтетических пигментов является одним из важнейших биохимических показателей реакции растения на условия выращивания и их изменение [10].

Изучение влияния агротехнологических приемов возделывания картофеля по косвенным признакам, характеризующим адаптивность различных генотипов к природно-климатическим условиям Севера, позволяет найти пути воздействия на

фотосинтетическую продуктивность растений и тем самым повысить урожайность культуры. Одним из таких приемов является внесение минеральных удобрений. В процессе роста и развития растения для формирования его листового аппарата необходимо обеспечить картофель такими макроэлементами, как азот и фосфор, что в дальнейшем влияет на формирование различных пигментов в листьях и на процесс фотосинтеза [11–14].

Целью работы является определение влияния различных доз минеральных удобрений на урожайность сорта картофеля Печорский и проведение качественного анализа его клубней и листьев на содержание в них основных фотосинтетических пигментов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Полевой опыт проводили в период 2023–2025 гг. на экспериментальных участках, находящихся в системе шестипольного культурного севооборота Федерального исследовательского центра «Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук» — его структурного подразделения Института агробиотехнологий им. А.В. Журавского (Республика Коми, г. Сыктывкар) по соответствующим методикам³.

Питомник изучения агротехники сорта картофеля Печорский, относящийся к среднеранней группе спелости со сроком формирования товарных клубней к 85-у дню, представлен пятью вариантами со схемой посадки 0,7х0,3 м, двурядковые деланки с количеством 25 клубней в рядке в четырехкратной повторности, площадь одной деланки 10,5 м² [1, 2]. Общая площадь опыта составила 210 м². Предшественник — однолетние травы (вика, овес). Агротехника возделывания картофеля общепринятая для Республики Коми без химических обработок против болезней и вредителей [15]. Учет ранней урожайности проводился на 65-й день от посадки, учет общей урожайности — сплошной поделяночный на 85-й день⁴. Доза внесенных сложных комплексных гранулированных минеральных удобрений — нитроаммофоска (АО Минудобрения, Россия) с отношением 16:16:16% д.в. — N₄₈P₄₈K₄₈. Удобрения внесены один раз в качестве дождевой подкормки (30 г/м²) с последующей заделкой.

Схема опыта по применению минеральных удобрений:

- 1) контроль (без внесения удобрений),
- 2) 0,5 NPK — N₂₄P₂₄K₂₄,
- 3) 1,0 NPK — N₄₈P₄₈K₄₈,
- 4) 1,5 NPK — N₇₂P₇₂K₇₂,
- 5) 2,0 NPK — N₉₆P₉₆K₉₆.

¹ Жевора С.В., Анисимов Б.В., Симаков Е.А. [и др.]. Картофель. Сортосые ресурсы, современные агробиотехнологии, регламенты качества. Чебоксары: ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха. 2024; 164.

² Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех». 2024; 620.

³ Методические указания по технологии селекции картофеля. Москва: Россельхозакадемия. 1994; 22.

⁴ Симаков Е.А., Склярова Н.П., Яшина И.М. Методические указания по технологии селекционного процесса картофеля. Москва: ООО «Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК». 2006; 70.

Отбор образцов (листьев картофеля) для исследования осуществлялся в разные фенологические фазы:

- полные всходы (25-й день от посадки),
- бутионизация (35-й день от посадки),
- начало цветения (45-й день от посадки),
- полное цветение (55-й день от посадки),
- формирование раннего урожая (65-й день от посадки).

Определение агрохимических свойств почвы проводили в соответствии с методами, используемыми при обследовании земельных участков⁵. Почва экспериментальных полей по зональному типу соответствует дерново-подзолистой, а по классификации механического состава — среднесуглинистая, с агрохимическими показателями в среднем за три года, представленными в таблице 1. Следует отметить, что несмотря на высокое содержание фосфора, он представлен преимущественно в труднодоступной для растений форме, что характерно для почв Северных регионов Российской Федерации, в том числе и Республики Коми. Недостаток указанного элемента питания в подвижной форме приводит к комплексному подходу внесения минеральных удобрений при возделывании картофеля, характеризующему региональные особенности почвы⁶.

Характеристика вегетационных периодов за 2023–2025 гг. по данным метеорологической станции «Сыктывкар» представлена в таблице 2.

Для статистической оценки и анализа полевых опытов использовали надстройку AgCSTAT (ВНИИО — филиал ФГБНУ ФНЦО, Россия) для Excel (США), адаптированную под дисперсионный анализ⁷. Расчет экономической эффективности технологии возделывания картофеля выполнен по соответствующим методикам^{8, 9}.

Лабораторные исследования проведены на базе Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Анализ нитратов в клубнях картофеля выполнен согласно МУ 5048-89¹⁰. Для определения концентрации хлорофиллов *a* и *b* готовили вытяжки из десяти листовых пластинок в 96%-ном растворе этанола. Спектрофотометрический анализ про-

Таблица 1. Характеристика опытного участка
Table 1. Characteristics of the experimental site

Показатель	Год исследований			В среднем
	2023	2024	2025	
Органическое вещество, %	5,6	5,0	6,8	5,8
pH _{сол.} , ед.	5,7	5,2	5,8	5,6
N _г , ммоль/100 г	2,6	2,9	2,9	2,8
P ₂ O ₅ , мг/кг почвы	556,9	427,0	486,0	490,0
K ₂ O, мг/кг почвы	99,8	151,1	266,0	172,3
Обменный кальций, ммоль/100 г почвы	11,6	5,4	11,9	9,6
Обменный магний, ммоль/100 г почвы	2,0	1,4	3,5	2,3

водили с использованием прибора GENESYS 150 (США). Содержание хлорофилла *a* измеряли при длине волны 665 нм, хлорофилла *b* — 649 нм. Концентрация пигментов определялась по формулам Вернона (1–3)¹¹. Площадь поверхности листьев картофеля определялась методом высечек¹². Величина листового индекса (Leaf Area Index, LAI) определялась как отношение площади листьев растений к площади посадки картофеля.

Обработка статистических данных проводилась с использованием пакета программы Past 4.17 (Naturhistorisk museum — UiO, Норвегия).

$$C_{\text{хл. a}} = 13,70 \times D_{665} - 5,76 \times D_{649}, \quad (1)$$

$$C_{\text{хл. b}} = 25,80 \times D_{649} - 7,60 \times D_{665}, \quad (2)$$

$$C_{\text{хл. a + хл. b}} = 6,10 \times D_{665} + 20,04 \times D_{649}, \quad (3)$$

где: $C_{\text{хл. a}}$, $C_{\text{хл. b}}$, $C_{\text{хл. a + хл. b}}$ — соответственно концентрации хлорофиллов *a*, *b* и их суммы, мг/л; D — экспериментально полученные величины оптической плотности при соответствующих длинах волн.

Таблица 2. Характеристика вегетационного периода
Table 2. Characteristics of the growing season

Период (месяц)	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК	Продолжительность солнечного сияния, час
Июнь	12,8 / 17,1 / 15,0	40 / 62 / 196	0,9 / 1,2 / 4,6	288 / 282 / 209
Июль	18,4 / 18,7 / 16,3	126 / 85 / 84	2,2 / 1,5 / 1,7	240 / 345 / 297
Август	16,2 / 14,9 / 15,9	24 / 52 / 84	0,2 / 1,1 / 1,7	255 / 163 / 221

⁵ Практикум по агрохимии: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. Москва: Изд-во МГУ. 2001; 689.

⁶ Чеботарев Н.Т., Броварова О.В. Мелиоранты и минеральные удобрения как факторы повышения продуктивности агроценозов Европейского Севера. Сыктывкар: ГОУ ВО КРАГСиУ. 2021; 96.

⁷ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Агропромиздат. 1985; 351.

⁸ Кокурин Т.П., Прохорова Н.Н. Методические указания по расчету экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских работ для условий Северо-Востока европейской части РФ. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока. 2008; 65.

⁹ Мухамадьяров Ф.Ф., Фигурин В.А., Ашихмин В.П., Коробицин С.Л., Кокурин Т.П., Халтурин В.С., Кодочигова В.В., Плетнев Н.А. Методическое пособие по определению энергозатрат при производстве продовольственных ресурсов и кормов для условий Северо-Востока европейской части Российской Федерации. Киров: НИИСХ Северо-Востока. 1997; 62.

¹⁰ МУ 5048-89. Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства. Москва: Институт питания АМН СССР. 1989; 51.

¹¹ Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Большой практикум по фотосинтезу: учебное пособие для студентов вузов. Москва: Издательский центр «Академия». 2003; 256.

¹² Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Колос. 1968; 336.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Учет раннего урожая на 65-й день после посадки свидетельствует о влиянии применения минеральных удобрений на скороспелость (табл. 3). Наиболее интенсивно клубнеобразование и нарастание их массы наблюдалось в 4 варианте (1,5 NPK). Применение двойной дозы минеральных удобрений по сравнению с контролем повысило раннюю урожайность на 132,3% (+ 12,1 т/га), со стандартной технологией (1,0 NPK) — на 36,8% (+ 5,7 т/га) (НСР₀₅ — 3,4 т/га).

Учет урожая в период уборки показал, что достоверная прибавка урожайности в сравнении со стандартной технологией получена в вариантах применения минеральных удобрений в дозах 1,5 и 2,0 — 33,5–35,7 т/га (+ 25,5–33,7%) (НСР₀₅ — 5,2 т/га).

Следует отметить тот факт, что при повышении дозы минеральных удобрений на значение половинной нормы и, сравнивая попарно варианты 2 (0,5 NPK), 3 (1,0 NPK) и 4 (1,5 NPK), 5 (2,0 NPK) достоверного повышения урожайности клубней не отмечено. Возрастающие дозы удобрений приводили к незначительному повышению урожайности, что было в пределах ошибки опыта (НСР₀₅ — 5,2 т/га). При аналогичном сравнении вариантов 4, 5 с остальными вариантами отмечено статистически значимая прибавка урожайности.

Результаты лабораторных исследований по определению пигментов в листьях картофеля сорта Печорский представлены в таблице 4.

На 25-й день от посадки (фаза полных всходов) наибольшие значения площади поверхности листьев и содержания в них хлорофиллов *a* и *b* было у варианта 2,0 NPK — 3215,4 м²/га и 1,88 мг/г, соответственно. В контрольном варианте (без удобрений) значения площади листовой поверхности и суммы хлорофиллов *a* и *b* были самыми низкими из всех вариантов — 1871,6 м²/га и 1,50 мг/г.

По результатам анализов на 35-й день от посадки (фаза бутонизации), наибольший прирост площади поверхности листьев (увеличение в 3 раза в сравнении с 25-ым днем) наблюдался у вариантов 0,5 NPK и 1,5 NPK. Концентрация фотосинтетических пигментов в указанных вариантах достигла своего максимума за период наблюдений, как и у контрольного варианта.

Концентрация хлорофиллов *a* + *b* во всех вариантах увеличилась в среднем в 1,2 раза. Содержание хлорофилла в листьях является сортовым признаком. Ранние и среднеранние сорта отличаются более низким накоплением пигментов по сравнению со среднепоздними и поздними сортами. По литературным данным, максимум содержания хлорофиллов отмечается в фазу бутонизации (1,7 мг/г сырой массы)¹³.

В контрольном варианте опыта и вариантах 0,5 NPK, 1,5 NPK, 2,0 NPK максимальное содержание пигментов в листьях картофеля отмечено в период фаз бутонизация — начало цветения.

В фазе начала цветения (45-й день от посадки) листовая поверхность растений во всех вариантах продолжала увеличиваться, наибольший прирост

Таблица 3. Урожайность картофеля (в среднем за 2023–2025 гг.), т/га
Table 3. Potato yield (average for 2023–2025), t/ha

№ п/п	Варианты	Урожайность							
		на 65-й день				на 85-й день			
		т/га	± к контролю	в % к контролю	в % к общей	т/га	± к контролю	в % к контролю	в % к стандартной технологии
1	Контроль	9,1	–	100,0	49,0	18,6	–	100,0	69,7
2	0,5 NPK	12,9	+3,8	141,8	50,0	25,6	+7,0	137,6	95,9
3	1,0 NPK	15,5	+6,4	170,3	58,0	26,7	+8,1	143,5	100,0
4	1,5 NPK	15,7	+6,6	172,5	47,0	33,5	+14,9	180,1	125,5
5	2,0 NPK	21,2	+12,1	232,3	59,0	35,7	+17,1	191,9	133,7
	НСР ₀₅	3,4				5,2			

Таблица 4. Характеристика картофеля по содержанию фотосинтетических пигментов и площади поверхности листьев
Table 4. Characteristics of potatoes by content of photosynthetic pigments and leaf surface area

Вариант	25-й день (полные всходы)			35-й день (бутонизация)			45-й день (начало цветения)			55-й день (массовое цветение)			65-й день (формирование раннего урожая)							
	концентрация хлорофилла, мг/г сырой массы		LAI ¹	концентрация хлорофилла, мг/г сырой массы		LAI	концентрация хлорофилла, мг/г сырой массы		LAI	концентрация хлорофилла, мг/г сырой массы		LAI	концентрация хлорофилла, мг/г сырой массы		LAI					
	<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>						
	<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>		<i>a</i>	<i>b</i>						
контроль	1,05	0,45	0,19	1871,6	1,40	0,58	0,40	3928,6	1,33	0,56	1,16	11564,6	1,26	0,49	1,14	11428,6	1,34	0,54	1,05	10539,7
0,5 NPK	1,24	0,51	0,25	2541,1	1,43	0,59	0,75	7500,0	1,07	0,49	0,95	9523,8	1,31	0,55	2,21	22087,9	1,31	0,52	2,37	23738,1
1,0 NPK	1,04	0,47	0,27	2714,3	1,28	0,52	0,48	4761,9	1,44	0,61	0,97	9682,5	1,55	0,59	2,19	21913,4	1,26	0,51	2,24	22428,6
1,5 NPK	1,12	0,47	0,25	2450,2	1,57	0,63	0,86	8571,4	1,33	0,54	1,35	13469,4	1,28	0,54	1,88	18825,4	1,38	0,52	3,52	35206,3
2,0 NPK	1,32	0,56	0,32	3215,4	1,45	0,59	0,70	6984,1	1,47	0,60	1,54	15384,6	1,45	0,58	1,83	18263,7	1,23	0,49	2,46	24563,5

Примечание: ¹LAI — листовый индекс, показывающий какая площадь листьев растений приходится на единицу площади посадки картофеля

¹³ Макаров А.М., Головки Т.К., Табаленкова Г.Н. Морфофизиология клубнеобразующих растений. Санкт-Петербург: Наука. 2001; 208.

(в 3 раза) наблюдался у контрольного варианта. Вариант 2,0 NPK по суммарному содержанию хлорофилла в листьях достиг максимума, также, как и по приросту площади поверхности листьев (рис. 1).

На 55-й день от посадки (фаза полного цветения) в варианте 1,0 NPK суммарное содержание хлорофиллов *a + b* достигло своих максимальных значений, при этом прирост площади листьев увеличился в 2,3 раза (в сравнении с 45-ым днем) — максимально за период наблюдений. В контроле и вариантах 1,5 NPK, 2,0 NPK установлено снижение концентрации пигментов, а в вариантах 0,5 NPK, 1,0 NPK их увеличение. Колебания концентрации хлорофилла в листьях могут вызывать погодные условия. Существенное влияние оказывает водный режим, как избыточное, так и недостаточное увлажнение почвы [16]. За время отбора образцов были периоды с неблагоприятными агроклиматическими условиями, в том числе избыточным увлажнением почвы, что могло вызывать колебания концентрации пигментов в листьях.

В варианте 2,0 NPK, у которого максимальная концентрация пигментов отмечена на 45-й день от посадки, содержание хлорофиллов *a* и *b* на 35-й и 55-й день было практически на уровне максимальных значений, что обеспечивало продуктивную работу пигментного комплекса растений на протяжении периода бутонизация — цветение (рис. 2).

На 65-й день от посадки на стадии формирования раннего урожая клубней площади поверхности листьев у всех вариантов продолжали нарастать, за исключением контрольного варианта, где наблюдалось снижение. По отношению к предыдущему учету, площадь листовой поверхности в среднем по всем вариантам увеличилась на 25%.

За период учетов в сырых листьях картофеля суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b* в среднем по вариантам опыта составило: контроль — 1,80 мг/г; 0,5 NPK — 1,80 мг/г; 1,0 NPK — 1,86 мг/г; 1,5 NPK — 1,88 мг/г; 2,0 NPK — 1,95 мг/г.

Для продуктивности посадок картофеля определяющее значение имеет продолжительность работы ассимилирующей поверхности, когда ее размеры достигают примерно 3 м²/м² [17]. Максимальное значение листового индекса (LAI) было у варианта 1,5 NPK на 65-й день от посадки и составило 3,50. В остальных вариантах значения LAI находилось в пределах 2,20–2,50, в контрольном варианте — 1,05.

Полученные данные площади листовой поверхности картофеля при различных дозах внесения минеральных удобрений были ранжированы по порядку возрастания для каждого дня учета (рис. 3).

Сопоставление рангов площади поверхности листьев картофеля на разных фазах развития растений не выявило между ними статистически значимых различий (критерий Краскала–Уоллиса) в зависимости от дозы удобрений ($p = 0,0517$), однако сопоставление медиан рангов

Рис. 1. Динамика изменений площади поверхности листьев картофеля при разных дозах удобрений

Fig. 1. Dynamics of potato leaf surface area under different fertilizer doses

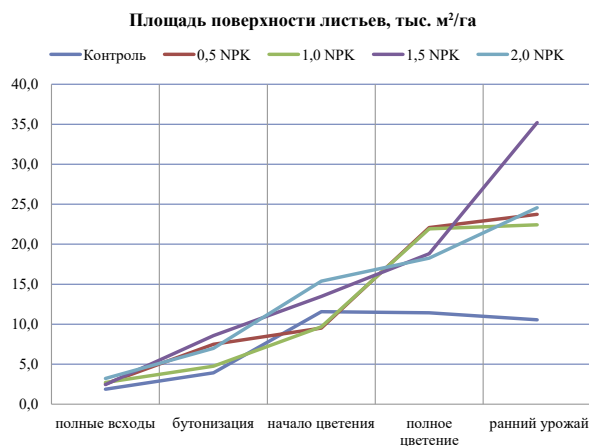


Рис. 2. Динамика суммарной концентрации хлорофиллов *a + b* в листьях картофеля в разные фенологические фазы

Fig. 2. Dynamics of the total concentration of chlorophylls *a + b* in potato leaves in different phenological phases

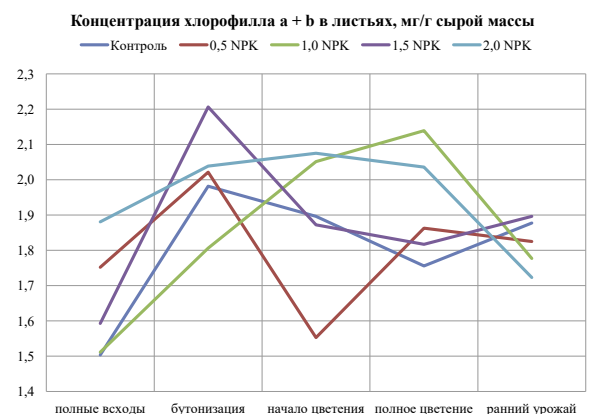
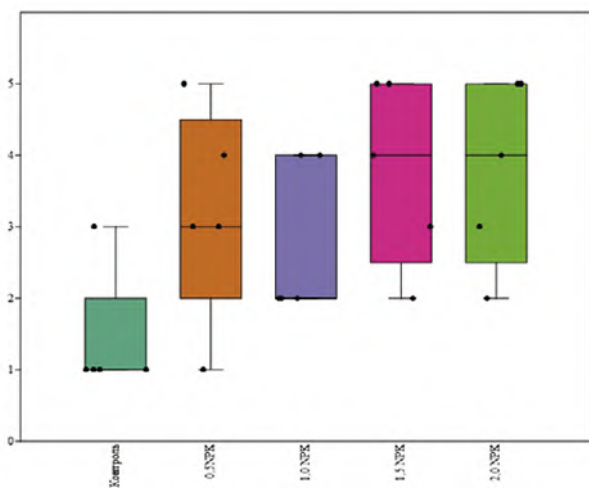


Рис. 3. Распределение рангов площади поверхности листьев картофеля при разных дозах удобрений

Fig. 3. Distribution of potato leaf surface area ranks under different fertilizer doses



(контроль — 1; 0,5 NPK — 3; 1,0 NPK — 2; 1,5 NPK — 4; 2,0 NPK — 4) позволяет говорить о тенденции к увеличению листового аппарата картофельных растений при внесении повышенных доз удобрений, что сказывается на процессе ассимиляции и, как следствие, увеличение урожайности [18].

Были проведены исследования качественных показателей клубней картофеля сорта Печорский (табл. 5). Содержание сухого вещества в клубнях составило от 19,5% (контроль) до 21,3% (2,0 NPK), в варианте с применением полной дозы минеральных удобрений 1,0 NPK — 20,4%.

Увеличение продуктивности надземной массы растений картофеля позволило получить и высокое значение такого параметра, как крахмалистость клубней, которое колебалось от 10,8% в контроле до 13,0% при внесении полудозы минеральных удобрений (НСР₀₅ — 1,1%) [19].

Результаты исследований по влиянию уровня минерального питания на содержание витамина С в клубнях картофеля сорта Печорский показали, что повышение доз полного минерального удобрения, особенно избыточных азотных и калийных составляющих, снижает его содержание. Так, в вариантах 4 (1,5 NPK) и 5 (2,0 NPK) по сравнению с контролем разница содержания в клубнях картофеля витамина С составила 6,3 мг% (НСР₀₅ — 1,7 мг%).

Концентрация нитратов в клубнях увеличивалась при повышении доз удобрений и изменялась в пределах от 51,0 до 94,0 мг/кг и во всех вариантах опыта не превышала разрешенного в Российской Федерации уровня ПДК, равного 250 мг/кг сырых клубней.

По результатам исследований проведен расчет экономической эффективности, представленный в таблице 6.

Совокупные затраты средств на выращивание картофеля в контроле составили 169,9 тыс. руб./га, в опытных вариантах 178,7–190,9 тыс. руб./га, что на 8,8–21,0 тыс. руб./га больше. Выручка от реализации урожая в контроле — 92,4 тыс. руб./га. В лучшем 5 опытном варианте (2,0 NPK) — 312,5 тыс. руб./га, т.е. на 220,1 тыс. руб./га больше, чем в контроле и на 118,0 тыс. руб./га выше, чем в 3 варианте с внесением NPK в дозе 1,0.

При внесении минеральных удобрений в двойной дозе уровень рентабельности, определяемый отношением условной прибыли к условным затратам, выраженный в процентах, составил 163,7% при прибыли 312,5 тыс. руб./га, что больше по сравнению с контролем более, чем в три раза, а со стандартной технологией (1,0 NPK) в полтора раза. Применение минеральных удобрений позволяет значительно снизить себестоимость продукции в сравнении с контрольным вариантом на

Таблица 5. Химический состав клубней картофеля

Table 5. Chemical composition of potato tubers

№ п/п	Варианты	Сухое вещество, %	Крахмал, %	Нитраты, мг/кг	Витамин С, мг %
1	Контроль	19,5	10,8	51,0	22,4
2	0,5 NPK	19,9	10,9	61,0	21,9
3	1,0 NPK	20,4	11,4	61,0	19,5
4	1,5 NPK	20,1	13,0	64,0	16,1
5	2,0 NPK	21,3	12,7	94,0	16,1
	НСР ₀₅	1,8	1,1	5,9	1,7

Таблица 6. Экономическая эффективность технологии выращивания картофеля сорта Печорский

Table 6. Economic efficiency of the technology for growing Pechorsky potato variety

№ п/п	Варианты	Урожайность, т/га	Условные затраты, тыс. руб./га	Условная стоимость продукции, тыс. руб./га	Условная прибыль, тыс. руб./га	Уровень рентабельности, %	Себестоимость продукции, тыс. руб./т
1	Контроль	18,6	169,9	262,3	92,4	54,4	9,1
2	0,5 NPK	25,6	178,7	361,0	182,3	102,0	7,0
3	1,0 NPK	26,7	182,0	376,5	194,5	106,9	6,8
4	1,5 NPK	33,5	186,4	472,4	286,0	153,4	5,6
5	2,0 NPK	35,7	190,9	503,4	312,5	163,7	5,3

2,1–3,8 тыс. руб./т или в процентном отношении на 23–42%.

Выводы/Conclusions

В результате исследований доказана высокоинтенсивная отзывчивость картофеля сорта Печорский на внесение различных доз минеральных удобрений, что позволяет получить в опытных вариантах урожайность до 25,6–35,7 т/га, с высокими качественными характеристиками клубней (сухое вещество, крахмал), превышающих вариант без внесения удобрений.

Отмечена тенденция к увеличению листового аппарата картофельных растений при внесении повышенных доз удобрений, что сказывается на процессе ассимиляции и, как следствие, может оказывать влияние на урожайность.

Результат экономического анализа позволяет рекомендовать применение комплекса полных минеральных удобрений по схеме 1,5 NPK и 2,0 NPK, что обеспечивает получение продукции с высоким уровнем рентабельности в агроклиматических условиях Республики Коми.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проведены по государственному заданию № FUUU-2026-0010 (регистрационный № 1023032700219-2-4.1.6) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

FUNDING

The research was conducted under state assignment No. FUUU-2026-0010 (registration No. 1023032700219-2-4.1.6) with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тулинов А.Г., Лобанов А.Ю. Оценка новых сортов и гибридов картофеля на экологическую пластичность. *Пермский аграрный вестник*. 2022; (2): 85–90. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_38_85
2. Тулинов А.Г. Перспективный гибрид картофеля продовольственного назначения для Республики Коми. *Пермский аграрный вестник*. 2023; (3): 53–61. EDN KNOVXL
3. Котова З.П., Евдокимова З.З., Калашник М.В., Головина Л.Н., Челнокова В.В. Подбор перспективных гибридов картофеля по параметрам их адаптивности для условий Европейского Севера. *Аграрный вестник Урала*. 2019; (7): 26–32. https://doi.org/10.32417/article_5d52af44264156.24918284
4. Глаз Н.В., Васильев А.А., Дергилева Т.Т., Мушинский А.А. Оценка экологической пластичности среднеранних и среднеспелых сортов картофеля. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2019; (1): 10–19. <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-11002>
5. Щербаклова А.С. Агроклиматические районы и урожайность сельскохозяйственных культур в изменяющихся условиях регионального климата. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021; 16(1): 142–147. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-142-147>
6. Гуреева Ю.А., Батов А.С., Березовская А.Г., Кондратьева И.В. Селекция сортов картофеля различного целевого назначения в условиях лесостепи Новосибирского Приобья. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2024; (4): 45–53. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-73-4-45-53>
7. Гаджиев Н.М., Лебедева В.А., Комаров А.А. Испытание сортов картофеля российской селекции в условиях Ленинградской области. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024; 113: 95–99. EDN DIJCOF
8. Яковлева Н.С., Охлопкова П.П., Ефремова С.П. Селекция картофеля в условиях Якутии. *Аграрная наука*. 2021; (1): 81–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-344-1-81-84>
9. Байбулатов Т.С., Хамхоев Б.И., Цуров М.Т. Обработка клубней картофеля стимуляторами роста при посадке способствует получению раннего урожая. *Аграрная наука*. 2023; (7): 102–106. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-102-106>
10. Бакунов А.Л., Милехин А.В., Рубцов С.Л., Шевченко С.Н. Содержание фотосинтетических пигментов как косвенный признак устойчивости сортов картофеля к высоким температурам воздуха и недостаточному увлажнению. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020; (2): 8–13. EDN KAONRH
11. Захарова М.Н., Рожкова Л.В., Ушакова Е.Ю. Формирование семенного материала картофеля сорта Евпаты с использованием различных доз минеральных удобрений и сроков скашивания ботвы. *Аграрная наука*. 2022; (5): 78–81. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-78-81>
12. Завьялова Н.Е., Шишков Д.Г., Иванова О.В. Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на урожайность и показатели качества клубней картофеля. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023; 24(3): 409–416. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.409-416>
13. Куаналиева М.К., Калиева Т.К., Сарсенгалиев Р.С. Влияние различных доз минеральных удобрений на урожайность и качество раннего картофеля в условиях Западно-Казахстанской области. *Пермский аграрный вестник*. 2022; (1): 50–57. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_37_50
14. Чеботарев Н.Т., Броварова О.В. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на продуктивность агроценозов Европейского Северо-Востока. *Аграрная наука*. 2022; (5): 87–92. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-87-92>
15. Тулинов А.Г., Лобанов А.Ю. Результаты испытания гибридов картофеля селекционных питомников в условиях Республики Коми. *Аграрная наука*. 2021; (7–8): 85–88. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-351-7-8-85-88>
16. Икоева Л.П. Реакция фотосинтетических пигментов и урожайности картофеля разных сортов на листовую обработку препаратами. *Аграрный вестник Урала*. 2025; (3): 371–380. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-371-380>
17. Шашкарлов Л.Г., Самаркин А.А., Мefодьев Г.А. Формирование ассимиляционной поверхности листьев картофеля в зависимости от глубины посадки клубней и способа предпосадочной подготовки клубней к посадке. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019; 14(2): 68–71. https://doi.org/10.12737/article_5d3e16a104fed3.42056583

REFERENCES

1. Tulinov A.G., Lobanov A.Yu. Environmental plasticity evaluation of new potato varieties and hybrids. *Perm Agrarian journal*. 2022; (2): 85–90 (in Russian). https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_38_85
2. Tulinov A.G. A promising potato hybrid for food industry for the Komi Republic. *Perm Agrarian journal*. 2023; (3): 53–61 (in Russian). EDN KNOVXL
3. Kotova Z.P., Evdokimova Z.Z., Kalashnik M.V., Golovina L.N., Chelnokova V.V. Perspective potato hybrids selection by their adaptability factors in the European North conditions. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019; (7): 26–32 (in Russian). https://doi.org/10.32417/article_5d52af44264156.24918284
4. Glaz N.V., Vasiliev A.A., Dergileva T.T., Mushinskiy A.A. Middle-early and mid-ripening varieties of potato: environmental assessment of flexibility. *Far East agrarian herald*. 2019; (1): 10–19 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-11002>
5. Scherbakova A.S. Agroclimatic zones and yield of agricultural crops in the changing conditions of regional climate. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2021; 16(1): 142–147 (in Russian). <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-142-147>
6. Gureeva Yu.A., Batov A.S., Berezovskaya A.G., Kondratieva I.V. Selection of potato varieties of various target areas in the conditions of the forest-steppe of the Novosibirsk Ob region. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2024; (4): 45–53 (in Russian). <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-73-4-45-53>
7. Gadzhiev N.M., Lebedeva V.A., Komarov A.A. Evaluation of some Russian potato varieties in conditions of Leningrad region. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024; 113: 95–99 (in Russian). EDN DIJCOF
8. Yakovleva N.S., Okhlopova P.P., Efremova S.P. Potato breeding in Yakutia. *Agrarian science*. 2021; (1): 81–84 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-344-1-81-84>
9. Baibulatonov T.S., Khamkhoev B.I., Tsurov M.T. The treatment of potato tubers with growth stimulants during planting contributes to an early harvest. *Agrarian science*. 2023; (7): 102–106 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-102-106>
10. Bakunov A.L., Milekhin A.V., Rubtsov S.L., Shevchenko S.N. Photosynthetic pigment content as a consequential resistance sign of potato varieties to high temperature and moisture lack. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2020; (2): 8–13 (in Russian). EDN KAONRH
11. Zakharova M.N., Rozhkova L.V., Ushakova E.Y. Formation of potato seed of Epatiy variety with the use of different doses of mineral fertilizers and timings of top mowing. *Agrarian science*. 2022; (5): 78–81 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-78-81>
12. Zavyalova N.E., Shishkov D.G., Ivanova O.V. The effect of increasing rates of mineral fertilizers on the yield and quality parameters of potato tubers. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023; 24(3): 409–416 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.3.409-416>
13. Kuanaliyeva M.K., Kaliyeva L.T., Sarsengaliyev R.S. Effect of different doses of mineral fertilizers on yield and quality of early potatoes in West Kazakhstan region. *Perm Agrarian journal*. 2022; (1): 50–57 (in Russian). https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_37_50
14. Chebotarev N.T., Brovarova O.V. The effect of long-term use of organic and mineral fertilizers on the productivity of agroecosystems of the European Northeast. *Agrarian science*. 2022; (5): 87–92 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-87-92>
15. Tulinov A.G., Lobanov A.Yu. Results of testing potato hybrids in breeding nurseries in the Komi Republic. *Agrarian science*. 2021; (7–8): 85–88 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-351-7-8-85-88>
16. Ikoeva L.P. Response of photosynthetic pigments and yield of different potato varieties to foliar treatment with preparations. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; (3): 371–380 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-371-380>
17. Shashkarov L.G., Samarkin A.A., Mefod'ev G.A. Formation of the assimilation surface of potato leaves, depending on seeding depth of tubers and pre-sowing treatment methods. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2019; 14(2): 68–71 (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5d3e16a104fed3.42056583

18. Балиук Н.В., Ламан Н.А., Калацкая Ж.Н. Физиолого-биохимические особенности реализации адаптивного потенциала клонольно микропропагированных растений картофеля при их обработке иммуностимуляторами. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук.* 2024; 69(1): 15–24. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-1-15-24>

19. Кучер Д.Е., Кой К., Пивень Н.П., Введенский В.В., Шуравилин А.В. Накопление биомассы картофеля и формирование его урожайности в зависимости от технологии возделывания, удобрений и сортов на серых лесных почвах Московской области. *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса.* 2019; (3): 7–10. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-41-3-7-10>

ОБ АВТОРАХ

Алексей Геннадьевич Тулинов

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник
toolalgen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7184-6113>

Мария Петровна Королева

младший научный сотрудник
maria.koroliowa@mail.ru

Институт агробιοтехнологий им. А.В. Журавского Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Ручейная, 27, Сыктывкар, Республика Коми, 167023, Россия

18. Baliuk N.V., Laman N.A., Kalatskaja J.N. Physiological and biochemical features of implementation of the adaptive potential of clonally micropropagated potato plants using immunostimulants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series.* 2024; 69(1): 15–24 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-1-15-24>

19. Kucher D.E., Coy K., Piven N.P., Vvedensky V.V., Shuravilin A.V. Effect of cultivation technology, fertilizers and varieties on potato biomass and yield when grown on gray forest soils in Moscow region. *Theoretical and applied problems of agro-industry.* 2019; (3): 7–10 (in Russian). <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-41-3-7-10>

ABOUT THE AUTHORS

Aleksei Gennad'evich Tulinov

Candidate of Agricultural Sciences, Researcher
toolalgen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7184-6113>

Maria Petrovna Koroleva

Junior Researcher
maria.koroliowa@mail.ru

A.V. Zhuravsky Institute of Agro-Biotechnologies of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
27 Rucheinaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167023, Russia

17 - 19 СЕНТЯБРЯ 2026

МВЦ «МинводыЭКСПО»
г. Минеральные Воды

PRO ОЗЕЛЕНЕНИЕ & РАСТЕНИЯ

Международная выставка
декоративного питомниководства
и зелёных технологий

2 500+ м²

Выставочной
площади

100+

Компаний-
участников

1 500

Профессионалов
отрасли

10+

Стран
участниц

15+

Мероприятий

80+

Топ-спикеров



З.А. Рехман¹ ✉А.В. Блинов¹А.А. Нагдалян¹А.С. Аскерова¹Д.Б. Голик¹М.Б. Ребезов^{2,3}¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия³Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ zafarehman@yandex.ru

Поступила в редакцию: 01.02.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Рехман З.А., Блинов А.В., Нагдалян А.А., Аскерова А.С., Голик Д.Б., Ребезов М.Б.

Zafar A. Rekhman¹ ✉Andrey V. Blinov¹Andrey A. Nagdalyan¹Alina S. Askerova¹Dmitry B. Golik¹Maksim B. Rebezov^{2,3}¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia²Gorbatov Research Center for Food Systems, Moscow, Russia³Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

✉ zafarehman@yandex.ru

Received by the editorial office: 01.02.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Rekhman Z.A., Blinov A.V., Nagdalyan A.A., Askerova A.S., Golik D.B., Rebezov M.B.

Исследование влияния предпосевной обработки семян пшеницы наночастицами диоксида марганца на солевой стресс

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Засоление почв — глобальный стрессор, ограничивающий продуктивность пшеницы. Марганец участвует в фотосинтезе и антиоксидантной защите, однако эффективность его наночастиц для повышения солеустойчивости изучена недостаточно. *Целью работы* являлась оценка влияния предпосевной обработки семян наночастицами MnO_2 на проростки пшеницы в условиях солевого стресса.

Методы. Наночастицы MnO_2 синтезированы с использованием алкилдиметиламинооксида в качестве стабилизатора. Фазовый состав оценивали с помощью рентгенофазового анализа. Энергетику взаимодействия оценивали квантово-химическим моделированием (B3LYP/6-31G*). Семена пшеницы обрабатывали суспензией MnO_2 (1 мг/л) и проращивали при 0,5–5,0% NaCl. Определяли морфометрические показатели и содержание фотосинтетических пигментов (спектрофотометрия). Данные обработаны двухфакторным ANOVA ($p < 0,05$).

Результаты. Рентгенофазовый анализ показал наличие аморфной фазы диоксида марганца с гексагональной решеткой. Моделирование подтвердило энергетическую выгоду связывания MnO_2 с N-оксидной группой стабилизатора ($\Delta E = 1299$ ккал/моль). В контроле повышение NaCl до 1,0% снижало сумму пигментов с 0,087 до 0,032 мг/г, а 2,5% NaCl вызывало гибель проростков. Обработка MnO_2 обеспечила выживание при 2,5% NaCl (сумма пигментов 0,074 мг/г), что лишь незначительно уступает контролю при 0,5% NaCl. При 1,0% NaCl содержание пигментов в опытных образцах (0,078 мг/г) было сопоставимо с контролем при 0,5% NaCl, что свидетельствует о полном нивелировании стресса. Увеличение доли каротиноидов указывает на активацию антиоксидантной защиты. Наночастицы MnO_2 эффективно защищают фотосинтетический аппарат пшеницы при солевом стрессе, что открывает перспективы создания новых форм удобрений.

Ключевые слова: пшеница, солевой стресс, фотосинтетические пигменты, антиоксидантная защита, марганец, моделирование

Для цитирования: Рехман З.А., Блинов А.В., Нагдалян А.А., Аскерова А.С., Голик Д.Б., Ребезов М.Б. Исследование влияния предпосевной обработки семян пшеницы наночастицами диоксида марганца на солевой стресс. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 94–101. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-94-101>

Study of the effect of pre-sowing treatment of wheat seeds with manganese dioxide nanoparticles on salt stress

ABSTRACT

Relevance. Soil salinity is a global stressor limiting wheat productivity. Manganese participates in photosynthesis and antioxidant defense, but the efficacy of its nanoforms for improving salt tolerance remains underexplored. This study aimed to evaluate the effect of pre-sowing seed treatment with MnO_2 nanoparticles on wheat seedlings under salt stress.

Methods. MnO_2 nanoparticles were synthesized using alkyl dimethyl amine oxide as a stabilizer. Phase composition was assessed using X-ray diffraction analysis. The energetics of interactions were estimated using quantum chemical modeling (B3LYP/6-31G*). Wheat seeds were treated with a MnO_2 suspension (1 mg/L) and germinated at 0.5–5.0% NaCl. Morphometric parameters and photosynthetic pigment content were determined (spectrophotometry). Data were analyzed using a two-way ANOVA ($p < 0.05$).

Results. X-ray diffraction analysis revealed the presence of an amorphous manganese dioxide phase with a hexagonal lattice. Modeling confirmed the energetic favorability of MnO_2 binding to the N-oxide group of the stabilizer ($\Delta E = 1299$ kcal/mol). In the control, increasing NaCl to 1.0% reduced the total pigment content from 0.087 to 0.032 mg/g, while 2.5% NaCl caused seedling mortality. MnO_2 treatment ensured survival at 2.5% NaCl (total pigment content 0.074 mg/g), which is only slightly inferior to the control at 0.5% NaCl. At 1.0% NaCl, the pigment content in the test samples (0.078 mg/g) was comparable to the control at 0.5% NaCl, indicating complete stress relief. An increase in the proportion of carotenoids indicates activation of antioxidant defenses. MnO_2 nanoparticles effectively protect the photosynthetic apparatus of wheat under salt stress, opening up prospects for the development of new forms of fertilizer.

Key words: wheat, salt stress, photosynthetic pigments, antioxidant protection, manganese, modeling

For citation: Rekhman Z.A., Blinov A.V., Nagdalyan A.A., Askerova A.S., Golik D.B., Rebezov M.B. Study of the effect of pre-sowing treatment of wheat seeds with manganese dioxide nanoparticles on salt stress. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 94–101 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-94-101>

Введение/Introduction

Засоление почв представляет собой один из наиболее серьезных абиотических стрессов, которые ограничивают урожайность сельскохозяйственных культур [1–3].

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, около 6% всех земель суши и 20% орошаемых земель подвержены засолению, причем эти площади постоянно увеличиваются [4, 5]. Пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), обеспечивающая около 20% мирового потребления калорий и являющаяся ключевой продовольственной культурой для значительной части населения планеты, демонстрирует высокую чувствительность к засолению [6, 7].

Ключевым звеном солевого стресса является развитие окислительного стресса, обусловленного избыточной генерацией активных форм кислорода (АФК) в хлоропластах и митохондриях [8]. Повышенные концентрации АФК вызывают разрушение мембран, белков, что приводит к гибели клеток [9].

Современные подходы к решению проблемы солеустойчивости сельскохозяйственных культур включают селекционные программы, агротехнические приемы и методы предпосевной обработки. Наиболее эффективным решением проблемы является предпосевная обработка семян, позволяющая быстро и экономично модифицировать стрессовый ответ растений на всех этапах раннего развития [10, 11].

Перспективным направлением является обработка растворами эссенциальных микроэлементов, которые позволяют поддерживать важнейшие системы регуляции жизнедеятельности живых систем [12–14].

Исследования последних лет демонстрируют эффективность применения биологически активных веществ и микроэлементов для повышения солеустойчивости культур растений [15, 16]. Например, показано, что обработка семян пшеницы тиамином эффективно снижает окислительный стресс, индуцированный засолением [8]. Однако эффективность традиционных ионных форм микроэлементов часто ограничена их низкой биодоступностью и узким диапазоном между оптимальными и токсическими концентрациями [17].

Марганец (Mn) относится к числу эссенциальных микроэлементов, необходимых для нормального роста и развития растений [18]. Физиологическая роль марганца исключительно многообразна и определяется его способностью выступать кофактором многочисленных ферментов и участвовать в окислительно-восстановительных реакциях [19, 20].

Ключевая функция марганца в растительном организме связана с фотолизом воды и выделением молекулярного кислорода [21]. Кроме того, марганец является кофактором супероксиддисмутазы — ключевого фермента, обеспечивающего дисмутацию супероксидного анион-радикала

в митохондриях [22]. Данный фермент представляет собой один из наиболее значимых компонентов антиоксидантной системы, и его активность во многом определяет устойчивость растений к окислительному стрессу, индуцируемому абиотическими факторами, включая засоление [23].

Развитие нанобиотехнологий открывает новые возможности для создания высокоэффективных микроудобрений пролонгированного действия с улучшенными характеристиками [24, 25].

Наночастицы способны проникать через биологические барьеры и рассматриваются как перспективные агенты для целенаправленной доставки микроэлементов в растительные ткани [26, 27]. Наночастицы диоксида марганца представляют особый интерес, сочетая свойства источника эссенциального микроэлемента материала, который способен более эффективно взаимодействовать с активными формами кислорода [28]. Показано, что наночастицы оксида марганца обладают значительно более высокой эффективностью по сравнению с традиционными солями: применение 25% от рекомендуемой дозы Mn в форме наночастиц обеспечивало содержание доступного марганца в почве, эквивалентное 100% дозе $MnSO_4$, и способствовало увеличению урожайности зерна пшеницы на 5,2% [29]. Установлено, что наночастицы MnO_2 способны снижать токсическое действие тяжелых металлов на пшеницу за счет модуляции активности антиоксидантных ферментов в листьях [30]. Обработка семян наночастицами оксидов марганца повышала содержание фотосинтетических пигментов и улучшала профиль антиоксидантной системы у проростков арбуза и гороха [28, 31].

Целью настоящей работы является оценка влияния предпосевной обработки семян пшеницы наночастицами MnO_2 на морфобиологические параметры, фотосинтетическую активность проростков в условиях солевого стресса.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Синтез и исследование свойств наночастиц диоксида марганца, а также влияние на морфометрические и биохимические параметры сельскохозяйственных культур проводили на базе департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь, Россия) в декабре 2025 года.

Образцы наночастиц MnO_2 были получены взаимодействием перманганата калия с метионином, в качестве стабилизатора выступил алкилдиметиламиноксид [32].

Образцы диоксида марганца исследовали на рентгеновском дифрактометре Empyrean серии 2 (PANalytical, Нидерланды).

Квантово-химическое моделирование процесса стабилизации наночастиц MnO_2 алкилдиметиламиноксидом было выполнено в программном

обеспечении QChem¹ с использованием молекулярного редактора IQmol².

Расчеты проводились на оборудовании центра обработки данных (Schneider Electric) Северо-Кавказского федерального университета. Расчет полной энергии и других характеристик проводился со следующими параметрами: расчет — энергия, метод — B3LYP, базис — 6-31G*, сходимость — 5, силовое поле — Gchemical.

Исследование влияния наноразмерного MnO₂ на адаптивные защитно-приспособительные реакции сельскохозяйственных культур *Triticum aestivum* в условиях солевого стресса проводили следующим образом: для моделирования солевого (хлоридного) засоления семена пшеницы будут обработаны водным раствором NaCl (концентрации 0,5%, 1,0%, 2,5%, 5,0%), семена пшеницы (40 единиц на группу) помещали в пластиковые контейнеры с почвенным субстратом и выдерживали при оптимальной влажности 20 °C в течение 8 дней.

Жидкая фаза была разделена на две группы: контрольная группа с использованием дистиллированной воды и экспериментальная группа с раствором наночастиц MnO₂ с концентрацией 1 мг/л.

В течение 8-дневного периода прорастания ежедневно измеряли линейные размеры ростков в соответствии со стандартами ISTA (2006)³.

Для оценки влияния наночастиц MnO₂ на реакции сельскохозяйственных культур *Triticum aestivum* в условиях солевого стресса определяли содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в образцах.

Определение фотосинтетических пигментов проводили спектрофотометрическим методом: образец растворяли в 70% этаноле, нагревали на лабораторной магнитной мешалке IKA C-MAG HS 7 с подогревом (ООО «Компания НВ-ЛАБ», Россия), затем содержимое пробирки перетирали в фарфоровой ступке с добавлением карбоната кальция, после полного растирания образец тщательно промывали растворителем до полного обесцвечивания, полученный элюент фильтровали с помощью фильтровальной бумаги и исследовали на спектрофотометре UNICO 2100 (UNICO, США) в диапазоне от 350 до 700 нм.

Определение концентрации фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, а также их суммарное содержание) рассчитывали по формулам Вернона⁴.

Также оценивали морфометрические показатели семян (длина и количество проростков, количество биомассы)⁵.

Сырье и реактивы, применяемые в данном исследовании, поставлялись в университет с документами, удостоверяющими показателями качества и безопасности.

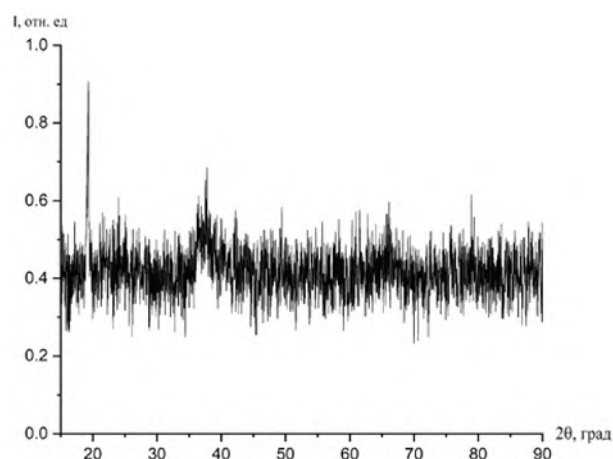
Все измерения проводились в 3-кратной повторности⁶⁻⁸, а полученные данные были проанализированы с помощью программы STATISTICA для Windows (Statsoft, Талса, США). Оценку достоверности различий между контрольными и опытными образцами выполняли с помощью двухвыборочного *t*-критерия Стьюдента для независимых выборок. Для оценки влияния двух факторов (концентрация NaCl и обработка наночастицами MnO₂) и их взаимодействия использовали двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим применением апостериорного критерия Тьюки (Tukey HSD test). Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$, высоко значимыми — при $p \leq 0,001$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На первом этапе проводили исследование фазового состава частиц диоксида марганца, результаты показаны на рисунке 1.

Анализ полученной дифрактограммы показывает, что диоксид марганца обладает аморфной

Рис 1. Дифрактограмма образца наночастиц диоксида марганца, стабилизированных алкилдиметиламинооксидом
Fig. 1. Diffraction pattern of a sample of manganese dioxide nanoparticles stabilized with alkyl dimethyl amine oxide



¹ <https://www.q-chem.com/>

² <https://www.iqmol.org/>

³ <https://www.seedtest.org/api/rm/DA3Q54A47QB3R3Q/sti132oct2006.pdf>

⁴ Зубкова Т. В., Масина Т. А. Влияние экологических условий выращивания на фотосинтетический потенциал декоративных растений // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. — 2021. — №. 1.

⁵ ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. — Москва : Издательство стандартов, 1984. — 31 с.

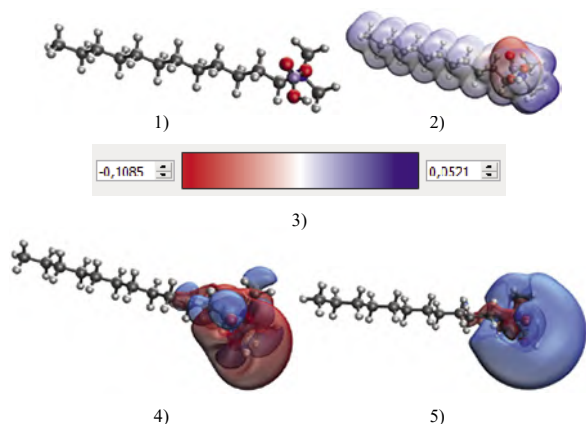
⁶ ГОСТ Р ИСО 22514-1-2015 Статистические методы. Управление процессами. Часть 2. Оценка пригодности и воспроизводимости процесса на основе модели его изменения во времени

⁷ ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса

⁸ ГОСТ Р ИСО 22514-7-2014 Статистические методы. Управление процессами. Часть 7. Воспроизводимость процессов измерений

Рис 2. Результаты моделирования диоксида марганца с алкилдиметиламинооксидом: 1 — модель молекулярного комплекса, 2 — распределение электронной плотности, 3 — градиент распределения электронной плотности, 4 — высшая заселенная молекулярная орбиталь, 5 — низшая свободная молекулярная орбиталь

Fig. 2. Simulation results of manganese dioxide with alkyldimethylamine oxide: 1 — model of a molecular complex, 2 — electron density distribution, 3 — gradient of electron density distribution, 4 — highest occupied molecular orbital, 5 — lowest unoccupied molecular orbital



фазой с гексагональной кристаллической решеткой, имеющей пространственную группу $I4/m$. Присутствие слабоинтенсивных уширенных пиков на спектре доказывает отсутствие строгой кристаллической решетки образца диоксида марганца.

Далее проводили компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия MnO_2 с алкилдиметиламинооксидом.

Модели взаимодействия и расчеты представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

Анализ полученных результатов показал, что оба типа взаимодействия диоксида марганца со стабилизатором обладают меньшим значением энергии, чем чистый MnO_2 , что говорит о термодинамической выгоде координирования. Из полученных данных квантово-химического моделирования можно сделать вывод, что взаимодействие диоксида марганца с алкилдиметиламинооксидом является энергетически выгодным ($\Delta E \geq 1299$ ккал/моль) и химически стабильным ($\eta = 0,040$ эВ).

Установлено, что наиболее энергетически выгодным является взаимодействие оксида марганца с алкилдиметиламинооксидом через N-оксидную группу.

Далее проводили проращивание семян и изменение концентрации фотосинтетических пигментов в образцах пшеницы.

Фотографии образцов представлены на рисунке 3, а результаты морфометрических исследований — в таблице 2.

Анализ полученных данных показал, что повышение концентрации соли до 1,0% в контрольном образце приводит к значительному снижению содержания пигментов. Дальнейшее повышение концентрации приводит к полной гибели проростков, что свидетельствует о выраженном

Таблица 1. Результаты квантово-химического моделирования

Table 1. Results of quantum-chemical modeling

Тип взаимодействия	E, ккал/моль	ΔE , ккал/моль	E_{HOMO} , эВ	E_{LUMO} , эВ	η , эВ
MnO_2	-681,964	—	-0,183	0,075	0,129
Через N-оксидную группу	-1981,569	1299,605	-0,055	0,024	0,040
Через ионизированную аминогруппу	-1981,472	1299,508	-0,089	-0,009	0,040

Рис. 3. Фотографии образцов:

1 — образец, обработанный MnO_2 (0,5% NaCl), 2 — образец, обработанный MnO_2 (1,0% NaCl), 3 — образец, обработанный MnO_2 (2,5% NaCl), 4 — образец, обработанный MnO_2 (5,0% NaCl), 5 — контрольный образец (0,5% NaCl) 6 — контрольный образец (1,0% NaCl), 7 — контрольный образец (2,5% NaCl), 8 — контрольный образец (5,0% NaCl)

Fig. 3. Photographs of samples:

1 — sample treated with MnO_2 (0.5% NaCl), 2 — sample treated with MnO_2 (1.0% NaCl), 3 — sample treated with MnO_2 (2.5% NaCl), 4 — sample treated with MnO_2 (5.0% NaCl), 5 — control sample (0.5% NaCl), 6 — control sample (1.0% NaCl), 7 — control sample (2.5% NaCl), 8 — control sample (5.0% NaCl)



Таблица 2. Результаты измерения морфометрических параметров в образцах

Table 2. Results of measurements of morphometric parameters in samples

Условия	Ср. длина проростков, мм	Ср. кол-во живых проростков, шт.	Ср. биомасса зелёной части, г
Оксид марганца (0,5% NaCl)	120,6 ± 5,8	40,0 ± 1,2	7,20 ± 0,38
Оксид марганца (1% NaCl)	102,3 ± 5,1*	34,0 ± 1,6*	4,76 ± 0,28*
Оксид марганца (2,5% NaCl)	38,2 ± 3,5*	20,0 ± 1,8*	0,42 ± 0,05*
Оксид марганца (5% NaCl)	0	0	0
Контроль (0,5% NaCl)	111,8 ± 5,2	38 ± 1,5	6,84 ± 0,35
Контроль (1% NaCl)	90,3 ± 4,5*	30,0 ± 1,8*	4,20 ± 0,25*
Контроль (2,5% NaCl)	0	0	0
Контроль (5% NaCl)	0	0	0

Примечание: * $p < 0,05$ при концентрации NaCl 1% и $p < 0,001$ при концентрации NaCl 2,5%

ингибирующем эффекте засоления и согласуется с ранее полученными данными [23].

При минимальном засолении в образцах, обработанных наночастицами диоксида марганца, зафиксирован стимулирующий эффект роста относительно контрольного образца.

Аналогичная ситуация наблюдалась при среднем уровне засоления, обработка наночастицами сохранила жизнеспособность растений. Наиболее эффективное действие обработка диоксидом марганца показала при концентрации 2,5% NaCl:

Таблица 3. Результаты измерения фотосинтетических пигментов в образцах

Table 3. Results of measurements of photosynthetic pigments in samples

Культура	Образец	Параметр	Концентрация NaCl, %		
			0,5	1,0	2,5
Пшеница	Контроль	Хл а, мг/г сырой массы	0,037 ± 0,002	0,015 ± 0,001*	-
		Хл б, мг/г сырой массы	0,026 ± 0,002*	0,004 ± 0,001*	-
		Каротиноиды, мг/г сырой массы	0,024 ± 0,001*	0,013 ± 0,001*	-
		Сумма пигментов	0,087 ± 0,004	0,032 ± 0,002*	-
	MnO ₂	Хл а, мг/г сырой массы	0,037 ± 0,002	0,027 ± 0,002*	0,031 ± 0,002
		Хл б, мг/г сырой массы	0,018 ± 0,001*	0,021 ± 0,002*	0,017 ± 0,001*
		Каротиноиды, мг/г сырой массы	0,036 ± 0,002*	0,030 ± 0,002*	0,026 ± 0,002*
		Сумма пигментов	0,091 ± 0,004	0,078 ± 0,004*	0,074 ± 0,004*

Примечание: *p < 0,05 при концентрации NaCl 0,5 и 2,5% и p < 0,001 при концентрации NaCl 1%

сам факт выживания проростков в условиях, которые были летальны для контроля, говорит о значительном защитном действии наночастиц MnO₂ [28].

Далее проводили подготовку образцов и исследование содержания фотосинтетических пигментов, результаты представлены в таблице 3.

Анализ полученных результатов показал, что в контрольном образце при увеличении концентрации хлорида натрия с 0,5% до 1,0% снижаются показатели концентрации фотосинтетических пигментов, что может говорить о высокой чувствительности растения к действию солевого стресса, что также согласуется с данными, полученными другими исследователями [23].

Дальнейшее увеличение концентрации соли до 2,5 и 5% NaCl приводит к гибели растений.

В свою очередь, при обработке семян наночастицами диоксида марганца при концентрации NaCl 0,5% наблюдалось снижение содержания хлорофилла *b* при увеличении концентрации каротиноидов, что может говорить о перестройке фотосинтетического аппарата и усилении защитной функции.

При концентрации NaCl 1,0% показатели фотосинтетических пигментов достигают значений, сопоставимых с показателями контроля при концентрации NaCl 0,5%, что свидетельствует об отсутствии негативных эффектов засоления. При максимальном уровне засоления защитный эффект также сохранялся, показатели пигментов в данном случае оказались выше, чем в контрольных образцах при 1,0% NaCl.

Наибольший эффект обработки наночастицами наблюдается при высоких уровнях засоления (1,0 и 2,5% NaCl), что указывает на способность наночастиц оказывать защитное действие на фотосистемы растений.

Абсолютные значения пигментов в обработанных образцах при 2,5% NaCl (0,074 мг/г сырой массы) немного ниже показателей контрольных образцов при 0,5% NaCl (0,087 мг/г сырой массы), что показывает высокую эффективность фотосинтетических систем даже при экстремальном засолении.

Повышение содержания каротиноидов под действием MnO₂, вероятно, связано с активацией

экспрессии генов биосинтеза каротиноидов как защитного ответа на окислительный стресс, индуцированный засолением. Марганец, входящий в состав наночастиц, мог выступать кофактором Mn-содержащей супероксиддисмутазы (Mn-SOD), снижая уровень супероксид-аниона и предотвращая деградацию пигментов.

Исследование обработки семян наночастицами оксида марганца показало, что при умеренном засолении (1,0% NaCl) наночастицы полностью нивелируют стрессовые условия засоленности среды, данный факт может быть связан тем, что марганец является кофактором антиоксидантного фермента супероксиддисмутазы [18], обеспечивающего защиту от окислительного стресса. При высокой засоленности защитный эффект также наблюдался, хотя абсолютные значения пигментов и были несколько ниже по сравнению со средней засоленностью. Особое значение имеет динамика каротиноидов: увеличение их содержания под действием наночастиц говорит о повышении антиоксидантного потенциала клеток [28].

Выводы/Conclusions

Исследование образцов методом рентгеновской дифрактометрии доказало наличие аморфной фазы MnO₂ с гексагональной решеткой.

Методом квантово-химического моделирования установлено, что взаимодействие наночастиц MnO₂ с алкилдиметиламинооксидом энергетически наиболее выгодно через N-оксидную группу (ΔE = 1299 ккал/моль), что обосновывает использование данного стабилизатора.

Экспериментально подтверждено, что предпосевная обработка семян пшеницы наночастицами MnO₂ (1 мг/л) проявляет ростстимулирующий эффект при слабом засолении (0,5% NaCl) и выраженное протекторное действие в условиях умеренного и высокого солевого стресса.

При концентрации NaCl 1,0% обработка полностью нивелирует негативное влияние засоления: содержание фотосинтетических пигментов достигает значений, сопоставимых с контролем при 0,5% NaCl (0,078 и 0,087 мг/г соответственно).

В условиях летального для контроля засоления (2,5% NaCl) обработка обеспечивает выживание проростков, причем сумма пигментов (0,074 мг/г)

превышает показатели контроля при 1,0% NaCl (0,032 мг/г).

Установлено, что механизм защитного действия реализуется через модуляцию пигментного комплекса: увеличение доли каротиноидов при одновременном снижении хлорофилла *b* в условиях стресса свидетельствует об активации антиоксидантной защиты, что согласуется

с ролью марганца как кофактора супероксид-дисмутазы.

При экстремальном засолении (5,0% NaCl) обработка оказалась неэффективна.

Полученные данные обосновывают перспективность применения наночастиц MnO₂ для повышения солеустойчивости пшеницы и создания новых форм микроудобрений.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10046, <https://rscf.ru/en/project/23-76-10046/>

FUNDING:

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-76-10046, <https://rscf.ru/en/project/23-76-10046/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салех С., Мурыгина Е.А., Боме Н.А. Оценка морфофизиологических параметров устойчивости различных сортов озимой ржи к хлоридному засолению в лабораторных условиях. *Аграрная наука*. 2024; (10): 134–138. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-134-138>
2. Сафина Р.Р., Окунев Р.В., Рахманова Г.Ф., Гарафутдинова К.Р. Содержание аминокислот в растениях томата при применении препаратов «Глутамат натрия» и «Аминозол» в условиях солевого стресса. *Аграрная наука*. 2023; (12): 124–128. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-124-128>
3. Газе В.Л., Голубова В.А., Яновская Н.В., Ковтунов В.В. Устойчивость разных видов сорго к осмотическому стрессу под действием NaCl. *Аграрная наука*. 2022; (10): 96–99. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-363-10-96-99>
4. Negacz K., Malek Ž., de Vos A., Vellinga P. Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. *Journal of Arid Environments*. 2022; 203: 104775. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104775>
5. Shrivastava P., Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2015; 22(2): 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
6. Zenda T., Wang N., Dong A., Zhou Y., Duan H. Reproductive-Stage Heat Stress in Cereals: Impact, Plant Responses and Strategies for Tolerance Improvement. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(13): 6929. <https://doi.org/10.3390/ijms23136929>
7. Rehman S. *et al.* Salt stress in wheat: A physiological and genetic perspective. *Plant Stress*. 2025; 16: 100832. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100832>
8. Urooj S., Rasheed R., Ashraf M.A., Ali S., Hussain I. Thiamine Regulated Osmolyte Accumulation, Nutrient Acquisition, and ROS Metabolism to Lessen Salinity Effects on Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024; 24(2): 3560–3578. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01776-z>
9. Munns R., Tester M. Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 2008; 59: 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
10. Houmani H. *et al.* Revisiting the Potential of Seed Nutri-Priming to Improve Stress Resilience and Nutritive Value of Cereals in the Context of Current Global Challenges. *Agronomy*. 2024; 14(7): 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071415>
11. Liu H., Able A.J., Able J.A. Priming crops for the future: rewiring stress memory. *Trends in Plant Science*. 2022; 27(7): 699–716. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.11.015>
12. Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C. Editorial: Beneficial elements: novel players in plant biology for innovative crop production, volume II. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1303462. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1303462>
13. Nagdalian A.A. *et al.* Effect of selenium nanoparticles on biological and morphofunctional parameters of barley seeds (*Hordeum vulgare* L.). *Scientific Reports*. 2023; 13: 6453. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33581-6>
14. Blinov A. *et al.* Effect of Mn O₂ Nanoparticles Stabilized with Methionine on Germination of Barley Seeds (*Hordeum vulgare* L.). *Nanomaterials*. 2023; 13(9): 1577. <https://doi.org/10.3390/nano13091577>

REFERENCES

1. Saleh S., Murygina E.A., Bome N.A. Assessment of morphophysiological parameters of resistance of various varieties of winter rye to chloride salinity in laboratory conditions. *Agrarian science*. 2024; (10): 134–138 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-134-138>
2. Safina R.R., Okunev R.V., Rakhmanova G.R., Garafutdinova K.R. The content of amino acids in tomato plants when using the preparations “Monosodium Glutamate” and “Aminozol” in conditions of salt stress. *Agrarian science*. 2023; (12): 124–128 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-124-128>
3. Gaze V.L., Golubova V.A., Yanovskaya N.V., Kovtunov V.V. Osmotic stress resistance of different sorghum species affected by NaCl. *Agrarian science*. 2022; (10): 96–99 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-363-10-96-99>
4. Negacz K., Malek Ž., de Vos A., Vellinga P. Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. *Journal of Arid Environments*. 2022; 203: 104775. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104775>
5. Shrivastava P., Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2015; 22(2): 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
6. Zenda T., Wang N., Dong A., Zhou Y., Duan H. Reproductive-Stage Heat Stress in Cereals: Impact, Plant Responses and Strategies for Tolerance Improvement. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(13): 6929. <https://doi.org/10.3390/ijms23136929>
7. Rehman S. *et al.* Salt stress in wheat: A physiological and genetic perspective. *Plant Stress*. 2025; 16: 100832. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100832>
8. Urooj S., Rasheed R., Ashraf M.A., Ali S., Hussain I. Thiamine Regulated Osmolyte Accumulation, Nutrient Acquisition, and ROS Metabolism to Lessen Salinity Effects on Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024; 24(2): 3560–3578. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01776-z>
9. Munns R., Tester M. Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 2008; 59: 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
10. Houmani H. *et al.* Revisiting the Potential of Seed Nutri-Priming to Improve Stress Resilience and Nutritive Value of Cereals in the Context of Current Global Challenges. *Agronomy*. 2024; 14(7): 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071415>
11. Liu H., Able A.J., Able J.A. Priming crops for the future: rewiring stress memory. *Trends in Plant Science*. 2022; 27(7): 699–716. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.11.015>
12. Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C. Editorial: Beneficial elements: novel players in plant biology for innovative crop production, volume II. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1303462. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1303462>
13. Nagdalian A.A. *et al.* Effect of selenium nanoparticles on biological and morphofunctional parameters of barley seeds (*Hordeum vulgare* L.). *Scientific Reports*. 2023; 13: 6453. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33581-6>
14. Blinov A. *et al.* Effect of Mn O₂ Nanoparticles Stabilized with Methionine on Germination of Barley Seeds (*Hordeum vulgare* L.). *Nanomaterials*. 2023; 13(9): 1577. <https://doi.org/10.3390/nano13091577>

15. Lanza M.G.D.B., dos Reis A.R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021; 164: 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
16. Jomova K. *et al.* Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 367: 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173>
17. Rui M. *et al.* Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogaea* L.) physiological response and reduce nutritional quality: a life cycle study. *Environmental Science: Nano*. 2018; 5(9): 2088–2102. <https://doi.org/10.1039/C8EN00436F>
18. Schmidt S.B., Husted S. The Biochemical Properties of Manganese in Plants. *Plants*. 2019; 8(10): 381. <https://doi.org/10.3390/plants8100381>
19. Alejandro S., Höller S., Meier B., Peiter E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
20. Meier B., Mariani O., Peiter E. Manganese handling in plants: Advances in the mechanistic and functional understanding of transport pathways. *Quantitative Plant Biology*. 2025; 6: e16. <https://doi.org/10.1017/qpb.2025.10012>
21. Schmidt S.B., Eisenhut M., Schneider A. Chloroplast Transition Metal Regulation for Efficient Photosynthesis. *Trends in Plant Science*. 2020; 25(8): 817–828. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.003>
22. Grujicic J., Allen A.R. Manganese Superoxide Dismutase: Structure, Function, and Implications in Human Disease. *Antioxidants*. 2025; 14(7): 848. <https://doi.org/10.3390/antiox14070848>
23. Rahman A., Hossain M.S., Mahmud J.-A., Nahar K., Hasanzaman M., Fujita M. Manganese-induced salt stress tolerance in rice seedlings: regulation of ion homeostasis, antioxidant defense and glyoxalase systems. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2016; 22(3): 291–306. <https://doi.org/10.1007/s12298-016-0371-1>
24. Михайлова О.П. Инновационные удобрения: влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур и экологические аспекты. *Рациональное использование природных ресурсов: теория, практика и региональные проблемы. Материалы V Всероссийской (национальной) конференции*. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина. 2025; 146–151. EDN PPDEVZ
25. Popova E.V., Tikhomirova V.E., Taliansky M.E., Kost O.A. Inorganic nano — and microparticles: methods for the preparation and possible applications in plant growing. *Russian Chemical Bulletin*. 2025; 74(10): 2947–2969. <https://doi.org/10.1007/s11172-025-4777-1>
26. Verma K.K. *et al.* Nanofertilizer Possibilities for Healthy Soil, Water, and Food in Future: An Overview. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 865048. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865048>
27. Shebl A., Hassan A.A., Salama D.M., Abd El-Aziz M.E., Abd Elwahed M.S.A. Green Synthesis of Nanofertilizers and Their Application as a Foliar for *Cucurbita pepo* L. *Journal of Nanomaterials*. 2019; 2019: 3476347. <https://doi.org/10.1155/2019/3476347>
28. Kasote D.M., Lee J.H.J., Jayaprakasha G.K., Patil B.S. Manganese Oxide Nanoparticles as Safer Seed Priming Agent to Improve Chlorophyll and Antioxidant Profiles in Watermelon Seedlings. *Nanomaterials*. 2021; 11(4): 1016. <https://doi.org/10.3390/nano11041016>
29. Kumar R., Jha A.K., Mandal N., Satdev, Kumari S. Synthesis, characterization and evaluation of novel manganese nanoclay polymer composite and nano-MnO₂ in wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2024; 187(5): 653–667. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300159>
30. Tahir K., Haroon U., Akbar M., Elahi M., Quraishi U.M. Tetragonal crystalline MnO nanoparticles alleviate Pb stress in wheat by modulating antioxidant enzymes in leaves. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2024; 30(8): 1401–1411. <https://doi.org/10.1007/s12298-024-01488-9>
31. Шумейко С.А. Применение наночастиц цинка, марганца и меди в растениеводстве: обзор современных исследований. *Оригинальные исследования*. 2025; 15(9): 263–291. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23502.32324>
32. Нагдальян А.А. и др. Исследование процесса формирования наночастиц диоксида марганца, стабилизированных алкилдиметилбензиламмония хлоридом. *Наноиндустрия*. 2024; 17(3–4): 230–239. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.230.239>
15. Lanza M.G.D.B., dos Reis A.R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021; 164: 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
16. Jomova K. *et al.* Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 367: 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173>
17. Rui M. *et al.* Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogaea* L.) physiological response and reduce nutritional quality: a life cycle study. *Environmental Science: Nano*. 2018; 5(9): 2088–2102. <https://doi.org/10.1039/C8EN00436F>
18. Schmidt S.B., Husted S. The Biochemical Properties of Manganese in Plants. *Plants*. 2019; 8(10): 381. <https://doi.org/10.3390/plants8100381>
19. Alejandro S., Höller S., Meier B., Peiter E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
20. Meier B., Mariani O., Peiter E. Manganese handling in plants: Advances in the mechanistic and functional understanding of transport pathways. *Quantitative Plant Biology*. 2025; 6: e16. <https://doi.org/10.1017/qpb.2025.10012>
21. Schmidt S.B., Eisenhut M., Schneider A. Chloroplast Transition Metal Regulation for Efficient Photosynthesis. *Trends in Plant Science*. 2020; 25(8): 817–828. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.003>
22. Grujicic J., Allen A.R. Manganese Superoxide Dismutase: Structure, Function, and Implications in Human Disease. *Antioxidants*. 2025; 14(7): 848. <https://doi.org/10.3390/antiox14070848>
23. Rahman A., Hossain M.S., Mahmud J.-A., Nahar K., Hasanzaman M., Fujita M. Manganese-induced salt stress tolerance in rice seedlings: regulation of ion homeostasis, antioxidant defense and glyoxalase systems. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2016; 22(3): 291–306. <https://doi.org/10.1007/s12298-016-0371-1>
24. Mikhailova O.P. Innovative fertilizers: the impact on the productivity of agricultural crops and environmental aspects. *Rational use of natural resources: theory, practice and regional problems. Proceedings of the V All-Russian (national) conference*. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. 2025; 146–151 (in Russian). EDN PPDEVZ
25. Popova E.V., Tikhomirova V.E., Taliansky M.E., Kost O.A. Inorganic nano — and microparticles: methods for the preparation and possible applications in plant growing. *Russian Chemical Bulletin*. 2025; 74(10): 2947–2969. <https://doi.org/10.1007/s11172-025-4777-1>
26. Verma K.K. *et al.* Nanofertilizer Possibilities for Healthy Soil, Water, and Food in Future: An Overview. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 865048. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865048>
27. Shebl A., Hassan A.A., Salama D.M., Abd El-Aziz M.E., Abd Elwahed M.S.A. Green Synthesis of Nanofertilizers and Their Application as a Foliar for *Cucurbita pepo* L. *Journal of Nanomaterials*. 2019; 2019: 3476347. <https://doi.org/10.1155/2019/3476347>
28. Kasote D.M., Lee J.H.J., Jayaprakasha G.K., Patil B.S. Manganese Oxide Nanoparticles as Safer Seed Priming Agent to Improve Chlorophyll and Antioxidant Profiles in Watermelon Seedlings. *Nanomaterials*. 2021; 11(4): 1016. <https://doi.org/10.3390/nano11041016>
29. Kumar R., Jha A.K., Mandal N., Satdev, Kumari S. Synthesis, characterization and evaluation of novel manganese nanoclay polymer composite and nano-MnO₂ in wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2024; 187(5): 653–667. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300159>
30. Tahir K., Haroon U., Akbar M., Elahi M., Quraishi U.M. Tetragonal crystalline MnO nanoparticles alleviate Pb stress in wheat by modulating antioxidant enzymes in leaves. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2024; 30(8): 1401–1411. <https://doi.org/10.1007/s12298-024-01488-9>
31. Shumeyko S.A. Application of zinc, manganese, and copper nanoparticles in crop production: a review of recent studies. *Originalnyye issledovaniya*. 2025; 15(9): 263–291 (in Russian). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23502.32324>
32. Nagdalian A.A. *et al.* Study of the formation process of manganese dioxide nanoparticles stabilized by alkyldimethylbenzylammonium chloride. *Nanoindustry*. 2024; 17(3–4): 230–239. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.230.239>

ОБ АВТОРАХ**Зафар Абдулович Рехман¹**

преподаватель департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
zafrehman1027@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2809-4945>

Андрей Владимирович Блинов¹

кандидат технических наук, доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
blinov.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4701-8633>

Андрей Ашотович Нагдалян¹

кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пищевой и промышленной биотехнологии факультета пищевой инженерии и биотехнологий имени академика А.Г. Храмова
geniando@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Алина Салмановна Аскерова¹

лаборант Департамента функциональных материалов и инженерного конструирования vikalinka04@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9852-3055>

Дмитрий Борисович Голик¹

лаборант Департамента функциональных материалов и инженерного конструирования goldy_m@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0008-0663-6305>

Максим Борисович Ребезов^{2, 3}

- доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник²;
- доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов³
rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

¹Северо-Кавказский федеральный университет, ул. им. Пушкина, 1, Ставрополь, 355002, Россия

²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия;

³Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

ABOUT THE AUTHORS**Zafar Abdulovich Rekhman¹**

Lecturer at the Department of Functional Materials and Engineering Design
zafrehman1027@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2809-4945>

Andrey Vladimirovich Blinov¹

Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Associate Professor, Department of Functional Materials and Engineering Design
blinov.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4701-8633>

Andrey Ashotovich Nagdalyan¹

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Research Laboratory of Food and Industrial Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after Academician A.G. Khramtsov
geniando@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Alina Salmanovna Askerova¹

Laboratory assistant at the Department of Functional Materials and Engineering Design, vikalinka04@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9852-3055>

Dmitriy Borisovich Golik¹

Laboratory assistant at the Department of Functional Materials and Engineering Design, goldy_m@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0008-0663-6305>

Maksim Borisovich Rebezov^{2, 3}

- Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher²;
- Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products³
rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

¹North Caucasus Federal University, 1 Pushkin st., Stavropol, 355002, Russia

²Gorbatov Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin st., Moscow, 109316, Russia;

³Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht st., Yekaterinburg, 620075, Russia

Подпишитесь на печатные выпуски «АГРАРНОЙ НАУКИ» с любого месяца и на любой срок

» В РЕДАКЦИИ по тел. +7 (495) 777-67-67, доб. 1453, по agrovetpress@inbox.ru

» В АГЕНТСТВЕ ПОДПИСКИ ООО «Урал-Пресс Округ» <https://www.ural-press.ru/catalog/>

» БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ на отраслевом портале <https://agrarnayanauka.ru/rassylka-zhurnala/>

» ПОДПИСКА НА АРХИВНЫЕ НОМЕРА И ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ на сайте Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru



А.В. Блинов¹А.А. Нагдалян¹З.А. Рехман¹ ✉А.С. Аскерова¹Д.Б. Голик¹М.А. Пирогов¹М.Б. Ребезов^{2,3}¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия³Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ zafarehman@yandex.ru

Поступила в редакцию: 01.02.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Блинов А.В., Нагдалян А.А., Рехман З.А., Аскерова А.С., Голик Д.Б., Пирогов М.А., Ребезов М.Б.

Research article

 creative commons
Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-102-109

Andrey V. Blinov¹Andrey A. Nagdalyan¹Zafar A. Rekhman¹ ✉Alina S. Askerova¹Dmitry B. Golik¹Maksim A. Pirogov¹Maksim B. Rebezov^{2,3}¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia²Gorbatov Research Center for Food Systems, Moscow, Russia³Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

✉ zafarehman@yandex.ru

Received by the editorial office: 01.02.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Blinov A.V., Nagdalyan A.A., Rekhman Z.A., Askerova A.S., Golik D.B., Pirogov M.A., Rebezov M.B.

Исследование влияния наноразмерного оксида кобальта на устойчивость пшеницы (*Triticum aestivum*) к температурным условиям окружающей среды

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Экстремальные температуры являются одним из основных абиотических стрессоров, лимитирующих продуктивность пшеницы (*Triticum aestivum*). Перспективным подходом к повышению толерантности растений является предпосевная прайминг семян наночастицами микроэлементов. Цель работы — оценка влияния наночастиц Co_3O_4 , стабилизированных хитозаном, на устойчивость проростков пшеницы к гипо- и гипертермии.

Методы. Наночастицы Co_3O_4 синтезированы химическим осаждением с использованием в качестве стабилизатора низкомолекулярного хитозана. Энергетическую выгоду взаимодействия оценивали методом квантово-химического моделирования (B3LYP/6-31G*). Семена пшеницы обрабатывали раствором наночастиц (1 мг/л) и проращивали в течение 8 суток при температурах $-10\text{ }^\circ\text{C}$, $+20\text{ }^\circ\text{C}$ и $+50\text{ }^\circ\text{C}$. Определяли морфометрические показатели и содержание фотосинтетических пигментов (спектрофотометрия).

Результаты. Моделирование показало, что взаимодействие оксида кобальта с аминогруппой хитозана энергетически выгодно ($\Delta E \geq 1446$ ккал/моль), что обеспечивает пролонгированное высвобождение элемента. В нормальных условиях ($+20\text{ }^\circ\text{C}$) обработка увеличила длину проростков на 19% и их выживаемость. При тепловом стрессе ($+50\text{ }^\circ\text{C}$) предпосевная прайминг достоверно ($p < 0,05$) повысил сырую биомассу в 2,5 раза и содержание каротиноидов. Ключевым результатом является восстановление соотношения хлорофиллов *a/b* с 2,75 (контроль) до 1,51 (опыт) в условиях гипертермии, что свидетельствует о защите фотосинтетического аппарата. Применение наночастиц Co_3O_4 переводит растение в состояние стрессовой готовности, повышая его устойчивость к действию экстремальных температур.

Ключевые слова: наноразмерные частицы, кобальт, сельскохозяйственные культуры, пшеница, фотосинтетические пигменты, морфометрия, хитозан, температурный стресс, прайминг семян

Для цитирования: Блинов А.В. и др. Исследование влияния наноразмерного оксида кобальта на устойчивость пшеницы (*Triticum aestivum*) к температурным условиям окружающей среды. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 102–109. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-102-109>

Study of the effect of nanosized cobalt oxide on the resistance of wheat (*Triticum aestivum*) to environmental temperature conditions

ABSTRACT

Relevance. Extreme temperatures are a major abiotic stressor limiting the productivity of wheat (*Triticum aestivum*). A promising approach to enhancing plant tolerance is pre-sowing seed priming with nanoforms of micronutrients. This study aims to evaluate the effect of chitosan-stabilized Co_3O_4 nanoparticles on the resistance of wheat seedlings to hypo- and hyperthermia.

Methods. Co_3O_4 nanoparticles were synthesized by chemical precipitation using low-molecular-weight chitosan as a stabilizer. The energetic favorability of the interaction was assessed via quantum chemical modeling (B3LYP/6-31G*). Wheat seeds were treated with a nanoparticle solution (1 mg/L) and germinated for 8 days at $-10\text{ }^\circ\text{C}$, $+20\text{ }^\circ\text{C}$, and $+50\text{ }^\circ\text{C}$. Morphometric parameters and the content of photosynthetic pigments were determined (spectrophotometry).

Results. Modeling demonstrated that the interaction of cobalt oxide with the amino group of chitosan is energetically favorable ($\Delta E \geq 1446$ kcal/mol), ensuring prolonged release of the element. Under normal conditions ($+20\text{ }^\circ\text{C}$), the treatment increased seedling length by 19% and their survival rate. Under heat stress ($+50\text{ }^\circ\text{C}$), pre-sowing priming significantly ($p < 0.05$) increased fresh biomass by 2.5 times and carotenoid content. A key finding is the restoration of the chlorophyll *a/b* ratio from 2.75 (control) to 1.51 (treated) under hyperthermia, indicating protection of the photosynthetic apparatus. The application of Co_3O_4 nanoparticles induces a state of stress readiness in the plant, enhancing its tolerance to extreme temperatures.

Key words: nanoparticles, cobalt, agricultural crops, wheat, photosynthetic pigments, morphometry, chitosan, temperature stress, seed priming

For citation: Blinov A.V. et al. Study of the effect of nanosized cobalt oxide on the resistance of wheat (*Triticum aestivum*) to environmental temperature conditions. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 102–109 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-102-109>

Введение/Introduction

Глобальное изменение климата, характеризующееся устойчивым ростом среднегодовых температур и учащением экстремальных погодных явлений, представляет одну из наиболее серьезных угроз для современного сельского хозяйства [1–5].

Абиотические стрессы потенциально способны вызывать потери урожайности основных сельскохозяйственных культур в размере 51–82% от потенциально возможного уровня [6].

Пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.) демонстрирует высокую чувствительность к температурному стрессу на всех этапах онтогенеза [7, 8].

Особую опасность представляет тепловой стресс в репродуктивный период, поскольку он непосредственно нарушает жизнеспособность пыльцы и рылец пестика, процессы опыления, оплодотворения, закладки и налива зерна [9]. Несмотря на признанную значимость данной проблемы, исследования теплового стресса у зерновых культур исторически отставали по объему от работ, посвященных засухе и засолению [7].

В ответ на стрессовые воздействия в клетках растений, прежде всего в хлоропластах и митохондриях, происходит избыточная генерация АФК [10]. Данные молекулы обладают высокой окислительной способностью и при превышении пороговых концентраций вызывают деструкцию липидов мембран, белков, нуклеиновых кислот, что в конечном итоге приводит к гибели клеток и снижению продуктивности растений [11]. Парадоксально, но АФК выполняют также сигнальную функцию, запуская эпигенетические механизмы адаптации и формируя «стрессовую память», что позволяет растению эффективнее реагировать на стрессовые условия среды [10]. Однако потенциала внутренней антиоксидантной системы, включающей ферментативные компоненты (супероксиддисмутазу, аскорбатпероксидазу) и неферментативные соединения (каротиноиды, фенолы, аскорбиновую кислоту, пролин), часто недостаточно для полноценной защиты при интенсивном и пролонгированном тепловом воздействии [12].

Традиционные подходы к решению проблемы термической устойчивости включают селекцию устойчивых сортов и совершенствование агротехнических приемов. В этой связи возрастает интерес к методам предпосевной обработки семян, позволяющим усилить стрессовый ответ растений на критически важных ранних этапах развития [13, 14].

Особое направление представляет собой обработка семян биодоступными формами эссенциальных микроэлементов [15–17].

Исследования последних лет демонстрируют эффективность применения таких элементов, как селен, кремний и цинк [18–20], для активации антиоксидантной защиты, в том числе и для адаптации растений в условиях окислительного стресса [21, 22]. Тем не менее, эффективность

традиционных ионных форм микроэлементов часто лимитируется их низкой биодоступностью, быстрой инактивацией в почве и потенциальной фитотоксичностью при превышении оптимальных концентраций [23].

Одним из важных микроэлементов является кобальт (Co), однако его точные физиологические функции в растительном метаболизме остаются предметом активного изучения и дискуссий [24]. В отличие от животных, для которых кобальт является эссенциальным микроэлементом в составе витамина B₁₂ (кобаламина), роль данного металла в физиологии растений долгое время недооценивалась и ограничивалась преимущественно его значением для симбиотической азотфиксации у бобовых культур [25].

На данный момент известно, что в оптимальных концентрациях данный элемент регулирует многочисленные метаболические и ростовые процессы, участвует в биосинтезе фитогормонов, метаболизме фенольных соединений и стабилизации клеточных стенок [24]. Показано, что обработка семян низкими дозами кобальта способствует повышению активности антиоксидантных ферментов и накоплению осмопротекторов у различных сельскохозяйственных культур в условиях засоления и засухи [26]. Принципиально важным является наличие узкого диапазона между дефицитным, оптимальным и токсичным уровнями кобальта в растительном организме. Как недостаток, так и избыток Co вызывают необратимые физиолого-биохимические нарушения, причем токсическое действие реализуется через усиление продукции АФК и ингибирование ключевых метаболических путей [27, 28].

Стремительное развитие нанотехнологий открывает новые перспективы для создания высокоэффективных микроудобрений пролонгированного действия [29].

Наночастицы благодаря высокому соотношению поверхности к объему, повышенной реакционной способности и способности проникать через биологические барьеры рассматриваются как перспективные агенты для целенаправленной доставки микроэлементов в растительные ткани [30]. Наночастицы оксида кобальта Co₃O₄ представляют в этом контексте значительный интерес, сочетая свойства источника эссенциального микроэлемента и наноматериала с каталитической активностью [31, 32].

Несмотря на наличие отдельных работ, демонстрирующих эффективность наночастиц кобальта в регуляции роста и развития растений [26], систематические исследования, направленные на оценку потенциала предпосевной обработки семян наночастицами Co₃O₄ для повышения устойчивости пшеницы именно к тепловому стрессу, в доступной литературе практически отсутствуют. Фундаментальные вопросы, касающиеся оптимальных доз, механизмов проникновения наночастиц Co₃O₄ в ткани злаковых растений, их влияния

на фотосинтетический аппарат, антиоксидантную систему в условиях гипертермии, остаются неисследованными. Существующие на данный момент литературные данные ограничены изучением токсических эффектов высоких концентраций кобальта на пшеницу [27].

Хитозан известен как биоматериал благодаря своей биосовместимости, биоразлагаемости и нетоксичности. Эти свойства ясно указывают на то, что хитозан обладает большим потенциалом для будущего развития в различных областях науки [33–37].

Наноматериалы на основе хитозана обладают превосходными физическими и химическими свойствами, такими как большая площадь поверхности, пористость, прочность на разрыв, проводимость, фотолюминесценция, а также улучшенными механическими свойствами по сравнению с чистым хитозаном [38].

Мы предположили, что обработка семян наночастицами Co_3O_4 , стабилизированными хитозаном, способна индуцировать состояние стрессовой готовности (прайминга), что позволит проросткам пшеницы эффективнее активировать защитные системы (в частности, модулировать состав фотосинтетических пигментов) при последующем воздействии как высоких, так и низких температур.

Целью данной работы является исследование влияния наночастиц Co_3O_4 на повышение устойчивости пшеницы к действию экстремальных температур (гипо- и гипертермии).

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Синтез и исследование свойств наночастиц оксида кобальта, а также влияние на морфометрические и биохимические параметры сельскохозяйственных культур проводили на базе департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь, Россия) в декабре 2025 года.

Образцы наночастиц Co_3O_4 получали химическим осаждением из 0,1 М раствора $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (хч., АО «ЛенРеактив», Россия) путем добавления 25% раствора NH_4OH (ч.д.а., АО «ЛенРеактив», Россия) до pH 9,0 при постоянном перемешивании (500 об/мин) и температуре 60°C на магнитной мешалке ИКА С-MAG HS 7 с подогревом (ООО «Компания НВ-ЛАБ», Россия). В качестве стабилизатора использовали 0,1% (мас/об) раствор низкомолекулярного хитозана (ММ 50 кДа) (ООО «Биопрогресс», Россия) в 1% уксусной кислоте (АО «ЛенРеактив», Россия).

Квантово-химическое моделирование процесса стабилизации наночастиц Co_3O_4 было выполнено в программном обеспечении QChem¹

с использованием молекулярного редактора IQmol².

Расчеты проводились на оборудовании центра обработки данных (Schneider Electric) Северо-Кавказского федерального университета.

Расчет полной энергии и других характеристик проводился со следующими параметрами: расчет: энергия, метод: V3LYP, базис: 6-31G*, сходимость — 5, силовое поле — Ghemical.

Исследование влияния наноразмерного Co_3O_4 адаптивные защитно-приспособительные реакции сельскохозяйственных культур *Triticum aestivum* в условиях гипо- и гипертермии (жаро- и морозостойчивость) проводили следующим образом: образцы сеянцев культур *Triticum aestivum* подвергались гипо- и гипертермии (от -10 до 50 °C). Варьирование температуры проводили с помощью лабораторных термостатов и морозильных камер.

Семена пшеницы (40 единиц на группу) помещали в пластиковые контейнеры с почвенным субстратом, и выдерживали при оптимальной влажности 20 °C в течение 8 дней.

Жидкая фаза была разделена на две группы: контрольная группа с использованием дистиллированной воды и экспериментальная группа с раствором наночастиц Co_3O_4 с концентрацией 1 мг/л.

В течение 8-дневного периода прорастания ежедневно измеряли линейные размеры ростков в соответствии со стандартами ISTA (2006) [39].

Для оценки влияния наночастиц Co_3O_4 на реакции сельскохозяйственных культур *Triticum aestivum* в условиях гипо- и гипертермии определяли содержание хлорофиллов а, б и каротиноидов в образцах. Определение фотосинтетических пигментов проводили спектрофотометрическим методом: образец растворяли в 70% этаноле, нагревали на лабораторной магнитной мешалке, затем содержимое пробирки перетирали в фарфоровой ступке с добавлением карбоната кальция, после полного растирания образец тщательно промывали растворителем до полного обесцвечивания, полученный элюент фильтровали с помощью фильтровальной бумаги и исследовали на спектрофотометре UNICO 2100 (UNICO, США) в диапазоне от 350 до 700 нм.

Определение концентрации фотосинтетических пигментов (хлорофиллов а и б, а также их суммарное содержание) рассчитывали по формулам Вернона. Также оценивали морфометрические показатели сеянцев (длина и количество проростков, количество биомассы) и морфологические изменения структуры растений:

Сырье и реактивы, применяемые в данном исследовании, поставлялись в университет с документами, удостоверяющими показателями качества и безопасности.

¹ <https://www.q-chem.com/>

² <https://www.iqmol.org/>

Все измерения проводились в 3-кратной повторности³⁻⁵, а полученные данные были проанализированы с помощью программы STATISTICA для Windows (Statsoft, Талса, США). Оценку достоверности различий между контрольными и опытными образцами выполняли с помощью двухвыборочного t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Для оценки влияния двух факторов (температура и обработка наночастицами) и их взаимодействия использовали двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На первом этапе проводили компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия Co_3O_4 с хитозаном.

Результаты представлены на рисунке 1.

Исходя из анализа полученных данных квантово-химического моделирования можно сделать вывод, что взаимодействие оксида кобальта с хитозаном является энергетически выгодным (для CoO — $\Delta E \geq 1446$ ккал/моль; для Co_2O_3 — $\Delta E \geq 2900$ ккал/моль) и химически стабильным (для CoO — $0,155 \leq \eta \leq 0,176$ эВ; для Co_2O_3 — $0,137 \leq \eta \leq 0,163$ эВ). Установлено, что наиболее энергетически выгодным является взаимодействие оксида кобальта с хитозаном через аминогруппу, присоединенную к C_2 остатка глюкозамина.

Стабилизация наночастиц хитозаном позволит обеспечить пролонгированное высвобождения кобальта, повысить адгезию наночастиц к поверхности семян и стимулировать иммунную системы растений.

Далее проводили проращивание семян и исследование морфометрических показателей в образцах пшеницы.

Фотографии образцов представлены на рисунке 2, а результаты исследований — в таблице 1.

Анализ полученных данных показывает, что тепловой стресс оказывает более выраженное ингибирование ростков пшеницы, чем пониженные температуры (-10°C), однако обработка семян наночастицами оксида кобальта повышает устойчивость проростков к обоим типам температурного воздействия.

Стоит отметить, что в нормальных температурных условиях обработка наночастицами оказывает ростстимулирующее действие, что подтверждается увеличением длины проростков и количество живых проростков относительно контрольного образца.

Таблица 1. Результаты измерения морфометрических параметров в образцах
Table 1. Results of measurements of morphometric parameters in samples

Условия	Средняя длина проростков, мм	Средняя кол-во живых проростков, шт.	Средняя биомасса зелёной части, г
Кобальт (норма)	$118,6 \pm 6,1$	$39,5 \pm 0,5$	$7,05 \pm 0,15$
Контроль (норма)	$99,4 \pm 9,1$	$35 \pm 0,4$	$6,60 \pm 0,20$
Кобальт, температура $+50^\circ\text{C}$	$103,2 \pm 6,8$	$25 \pm 2,1$	$2,80 \pm 0,25$
Контроль, температура $+50^\circ\text{C}$	$77,4 \pm 5,2$	$12 \pm 1,5$	$1,10 \pm 0,15$
Кобальт, температура -10°C	$75,6 \pm 5,1$	$28,0 \pm 2,2$	$2,24 \pm 0,21$
Контроль, температура -10°C	$70,7 \pm 4,8$	$22,0 \pm 1,8$	$1,90 \pm 0,20$

³ ГОСТ Р ИСО 22514-1-2015 Статистические методы. Управление процессами. Часть 2. Оценка пригодности и воспроизводимости процесса на основе модели его изменения во времени

⁴ ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса

⁵ ГОСТ Р ИСО 22514-7-2014 Статистические методы. Управление процессами. Часть 7. Воспроизводимость процессов измерений

Рис 1. Результаты моделирования оксида кобальта с хитозаном: 1 — модель молекулярного комплекса, 2 — распределение электронной плотности, 3 — градиент распределения электронной плотности, 4 — высшая заселенная молекулярная орбиталь, 5 — низшая свободная молекулярная орбиталь

Fig. 1. Results of modeling of cobalt oxide with chitosan: 1 — model of a molecular complex, 2 — electron density distribution, 3 — gradient of electron density distribution, 4 — highest occupied molecular orbital, 5 — lowest unoccupied molecular orbital

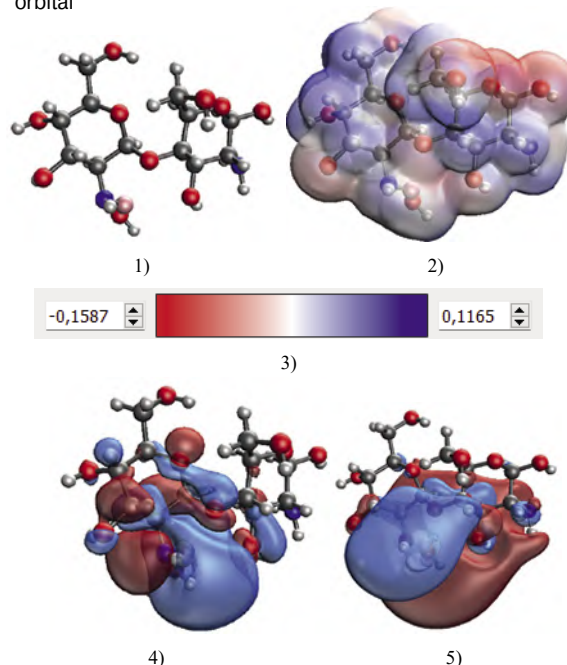


Рис. 2. Фотографии образцов: 1, 5 — контрольный образец (при 20°C), 2 — контрольный образец (при -10°C), 3, 7 — образец, обработанный Co_3O_4 (при 20°C), 4 — образец, обработанный Co_3O_4 (при -10°C), 6 — контрольный образец (при 50°C) 8 — образец, обработанный Co_3O_4 (при 50°C)

Fig. 2. Photographs of samples: 1, 5 — control sample (at 20°C), 2 — control sample (at -10°C), 3, 7 — sample treated with Co_3O_4 (at 20°C), 4 — sample treated with Co_3O_4 (at -10°C), 6 — control sample (at 50°C), 8 — sample treated with Co_3O_4 (at 50°C)

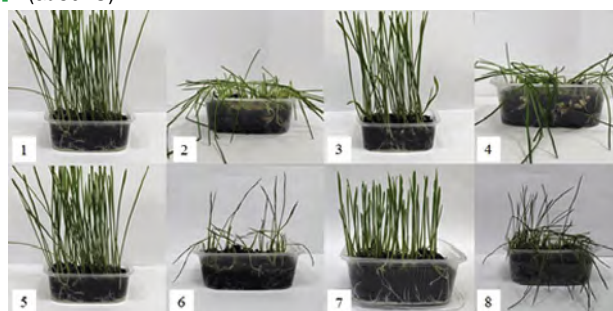


Таблица 2. Результаты измерения фотосинтетических пигментов в образцах

Table 2. Results of measurements of photosynthetic pigments and catalase levels in samples

Культура	Образец	Параметр	Температура, °С		
			-10	20	50
Пшеница	Контроль	Хл а, мг/г сырой массы	0,016 ± 0,002	0,239 ± 0,011	0,451 ± 0,021
		Хл б, мг/г сырой массы	0,022 ± 0,003	0,190 ± 0,009	0,164 ± 0,008
		Каротиноиды, мг/г сырой массы	0,015 ± 0,002	0,015 ± 0,002	0,474 ± 0,023
		Сумма пигментов	0,053 ± 0,004	0,444 ± 0,018	1,089 ± 0,045
	Опытный Co ₃ O ₄	Хл а, мг/г сырой массы	0,019 ± 0,002	0,364 ± 0,017	0,684 ± 0,032
		Хл б, мг/г сырой массы	0,052 ± 0,004	0,363 ± 0,018	0,454 ± 0,022
		Каротиноиды, мг/г сырой массы	0,044 ± 0,003	0,041 ± 0,003	0,737 ± 0,035
		Сумма пигментов	0,115 ± 0,007	0,768 ± 0,031	1,875 ± 0,072

Далее проводили подготовку образцов и исследование содержания фотосинтетических пигментов, результаты представлены в таблице 2.

Анализ полученных результатов показал, что в контрольных образцах при пониженной температуре наблюдалось резкое снижение фотосинтетических пигментов относительно оптимальной температуры (20 °С), что может быть связано со снижением ферментативной активности системы [10].

При повышенной температуре наблюдается увеличение содержания хлорофилла а с одновременным снижением хлорофилла b и значительное повышение концентрации каротиноидов.

Анализ опубликованных исследований показывает, что это является характерным адаптивным ответом, направленным на защиту системы растений от окислительного стресса [11].

Обработка семян наночастицами оксида кобальта существенно повлияла на изменение содержания фотосинтетических пигментов, наблюдается увеличение концентрации хлорофилла b и каротиноидов, что свидетельствует о выраженном протекторном действии наночастиц. Предположительно, механизм связан с активацией кобальтом антиоксидантных систем растения [15].

Стабильное повышение содержание пигментов при оптимальной температуре (20 °С) доказывает, что наноразмерный оксид кобальта является эффективным микроудобрением. Аналогичный защитный ответ был зафиксирован при повышенной температуре (50 °С): наблюдается значительное увеличение всех фотосинтетических пигментов и общего содержания пигментов.

Важным показателем в данном случае является соотношение фотосинтетических пигментов (Хл а/Хл б) — в контрольном образце оно составляло 2,75, что возможно указывает на окислительный стресс, а в образцах, обработанных Co₃O₄, данный показатель снизился до 1,51, что, возможно, указывает на восстановление целостности системы пигментов.

Полученные результаты показывают, что предварительная обработка помещает растение в состояние готовности к стрессу и позволяет эффективнее активировать системы защиты при воздействии факторов стрессовых окружающей среды.

Выводы/Conclusions

Методом квантово-химического моделирования установлено, что взаимодействие наночастиц оксида кобальта (Co₃O₄) с хитозаном является энергетически выгодным и химически стабильным. Наиболее предпочтительным, с точки зрения энергии связи, является взаимодействие через аминогруппу при С2 атоме остатка глюкозамина, что обосновывает использование хитозана в качестве эффективного стабилизатора для создания наноудобрений пролонгированного действия.

Экспериментально подтверждено, что предпосевная обработка семян пшеницы (*Triticum aestivum*) наночастицами Co₃O₄ в концентрации 1 мг/л проявляет ростстимулирующий эффект в оптимальных условиях (+20 °С). В условиях гипотермии (-10 °С) и гипертермии (+50 °С) обработка статистически значимо (p < 0,05) повышает выживаемость проростков, их линейные размеры и накопление биомассы, что согласуется с концепцией прайминга (индукции стрессовой готовности растений).

Выявлена дифференциальная реакция пигментного комплекса пшеницы на температурный стресс: воздействие низкой температуры (-10 °С) приводит к ингибированию биосинтеза всех групп фотосинтетических пигментов, тогда как гипертермия (+50 °С) индуцирует увеличение содержания хлорофилла а и каротиноидов на фоне снижения уровня хлорофилла b.

Установлено, что механизм защитного действия наночастиц Co₃O₄ реализуется через модуляцию стресс-индуцированных изменений в фотосинтетическом аппарате. Обработка семян способствует оптимизации соотношения хлорофиллов а/б и дополнительному накоплению каротиноидов в условиях гипертермии, что повышает устойчивость фотосистем к окислительному стрессу.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения наночастиц Co₃O₄, стабилизированных хитозаном, в качестве агентов для предпосевого праймирования семян зерновых культур (пшеницы) с целью повышения их толерантности к действию экстремальных температур в условиях изменяющегося климата.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10046, <https://rscf.ru/en/project/23-76-10046/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zandalinas S.I., Fritschi F.B., Mittler R. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster. *Trends in Plant Science*. 2021; 26(6): 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>
- Chaudhry S., Sidhu G.P.S. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Reports*. 2022; 41(1): 1–31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>
- Abdel Latef A.A.H., Zaid A., Abu Alhmad M.F., Abdelfattah K.E. The Impact of Priming with Al₂O₃ Nanoparticles on Growth, Pigments, Osmolytes, and Antioxidant Enzymes of Egyptian Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Cultivar. *Agronomy*. 2020; 10(5): 681. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050681>
- Фитишин К.Р. Влияние климатических изменений на урожайность основных сельскохозяйственных культур. *Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО 2024)*. Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ. 2024; 119–122. <https://doi.org/10.23947/itse.2024.119-122>
- Хисматуллин М.М., Лукманов А.А., Хисматуллин М.М., Хакимов Т.Б., Кузнецов М.Г., Куракова Ч.М. Современное состояние и экономическая эффективность мелиоративного земледелия в Республике Татарстан в условиях роста аридности климата. *Аграрная наука*. 2024; (5): 136–143. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-136-143>
- Khatana J.P. *et al.* Abiotic stress in field crops: A review. *International Journal of Research in Agronomy*. 2026; 9(2-A): 1–11. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2026.v9.i2a.4813>
- Houmani H. *et al.* Revisiting the Potential of Seed Nutri-Priming to Improve Stress Resilience and Nutritive Value of Cereals in the Context of Current Global Challenges. *Agronomy*. 2024; 14(7): 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071415>
- Зульфугарова С.Т., Рустамова С.М., Гусейнова И.М. Активность антиоксидантных ферментов и термостабильность мембран у генотипов твердой пшеницы при тепловом стрессе. *Аграрная наука*. 2022; (2): 56–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-356-2-56-61>
- Zenda T., Wang N., Dong A., Zhou Y., Duan H. Reproductive-Stage Heat Stress in Cereals: Impact, Plant Responses and Strategies for Tolerance Improvement. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(13): 6929. <https://doi.org/10.3390/ijms23136929>
- Hasanuzzaman M. *et al.* Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants*. 2020; 9(8): 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Dumanović J., Nepovimova E., Natić M., Kuča K., Jačević V. The Significance of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense System in Plants: A Concise Overview. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 11: 552969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
- Lanza M.G.D.B., dos Reis A.R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021; 164: 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
- Thakur M., Tiwari S., Kataria S., Anand A. Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds. *Scientia Horticulturae*. 2022; 305: 111355. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111355>
- Ahmad Z. *et al.* Enhancing plant resilience: Nanotech solutions for sustainable agriculture. *Heliyon*. 2024; 10(23): e40735. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40735>
- dos Reis A.R., Gonzalez-Porras C.V., Ferreira P.M., da Silva P.G., Freire F.B.S., Morais E.G. Unlocking resilience: physiological roles of benefit elements silicon, selenium and cobalt to enhance tolerance of crop plants against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2025; 229(B): 110515. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110515>

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

FUNDING

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-76-10046, <https://rscf.ru/en/project/23-76-10046/>

REFERENCES

- Zandalinas S.I., Fritschi F.B., Mittler R. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster. *Trends in Plant Science*. 2021; 26(6): 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>
- Chaudhry S., Sidhu G.P.S. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Reports*. 2022; 41(1): 1–31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>
- Abdel Latef A.A.H., Zaid A., Abu Alhmad M.F., Abdelfattah K.E. The Impact of Priming with Al₂O₃ Nanoparticles on Growth, Pigments, Osmolytes, and Antioxidant Enzymes of Egyptian Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Cultivar. *Agronomy*. 2020; 10(5): 681. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050681>
- Fitishin K.R. The impact of climate change on crop yields the main agricultural crops. *Innovative technologies in science and education (ITSE 2024)*. Collection of scientific papers of the XII International scientific and practical conference. Rostov-on-Don: DSTU-PRINT. 2024; 119–122 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/itse.2024.119-122>
- Khismatullin M.M., Lukmanov A.A., Khismatullin M.M., Khakimov T.B., Kuznetsov M.G., Kurakova Ch.M. Current state and economic efficiency of ameliorative farming in the Republic of Tatarstan under conditions of climate aridity growth. *Agrarian science*. 2024; (5): 136–143 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-136-143>
- Khatana J.P. *et al.* Abiotic stress in field crops: A review. *International Journal of Research in Agronomy*. 2026; 9(2-A): 1–11. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2026.v9.i2a.4813>
- Houmani H. *et al.* Revisiting the Potential of Seed Nutri-Priming to Improve Stress Resilience and Nutritive Value of Cereals in the Context of Current Global Challenges. *Agronomy*. 2024; 14(7): 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071415>
- Zulfugarova S.T., Rustamova S.M., Huseynova I.M. Antioxidant enzymes activity and membrane thermostability in durum wheat genotypes under heat stress. *Agrarian science*. 2022; (2): 56–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-356-2-56-61>
- Zenda T., Wang N., Dong A., Zhou Y., Duan H. Reproductive-Stage Heat Stress in Cereals: Impact, Plant Responses and Strategies for Tolerance Improvement. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(13): 6929. <https://doi.org/10.3390/ijms23136929>
- Hasanuzzaman M. *et al.* Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants*. 2020; 9(8): 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Dumanović J., Nepovimova E., Natić M., Kuča K., Jačević V. The Significance of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense System in Plants: A Concise Overview. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 11: 552969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
- Lanza M.G.D.B., dos Reis A.R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021; 164: 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
- Thakur M., Tiwari S., Kataria S., Anand A. Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds. *Scientia Horticulturae*. 2022; 305: 111355. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111355>
- Ahmad Z. *et al.* Enhancing plant resilience: Nanotech solutions for sustainable agriculture. *Heliyon*. 2024; 10(23): e40735. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40735>
- dos Reis A.R., Gonzalez-Porras C.V., Ferreira P.M., da Silva P.G., Freire F.B.S., Morais E.G. Unlocking resilience: physiological roles of benefit elements silicon, selenium and cobalt to enhance tolerance of crop plants against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2025; 229(B): 110515. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110515>

16. Nile S.H. *et al.* Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022; 20: 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
17. Астафурова Т.П. и др. Влияние наночастиц диоксида титана и оксида алюминия на морфобиологические параметры растений. Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011; (1): 113–122. EDN NGAZSR
18. Gudkov S.V. *et al.* Laser Ablation-Generated Crystalline Selenium Nanoparticles Prevent Damage of DNA and Proteins Induced by Reactive Oxygen Species and Protect Mice against Injuries Caused by Radiation-Induced Oxidative Stress. *Materials*. 2023; 16(14): 5164. <https://doi.org/10.3390/ma16145164>
19. Burmistrov D.E. *et al.* Bacteriostatic and Cytotoxic Properties of Composite Material Based on ZnO Nanoparticles in PLGA Obtained by Low Temperature Method. *Polymers*. 2022; 14(1): 49. <https://doi.org/10.3390/polym14010049>
20. Yanbaev F.M. *et al.* A Promising Material for Biomedicine and Food Production Based on a Polymethyl Methacrylate-like Resin with Silicon Dioxide Nanoparticles. *Molecules*. 2025; 30(24): 4740. <https://doi.org/10.3390/molecules30244740>
21. Jomova K. *et al.* Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 367: 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173>
22. Singhal R.K. *et al.* Beneficial elements: New Players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*. 2023; 100(2): 237–265. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00843-8>
23. Rui M. *et al.* Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogaea* L.) physiological response and reduce nutritional quality: a life cycle study. *Environmental Science: Nano*. 2018; 5(9): 2088–2102. <https://doi.org/10.1039/C8EN00436F>
24. Khalid S. *et al.* Cobalt in the soil-plant system across deficient, beneficial and toxic levels: data analysis and mechanistic interpretations. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2026; 28(2): 356–383. <https://doi.org/10.1039/D5EM00413F>
25. Noor J. *et al.* Enhancing saline stress tolerance in soybean seedlings through optimal $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios: a coordinated regulation of ions, hormones, and antioxidant potential. *BMC Plant Biology*. 2024; 24: 572. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05294-z>
26. Inayat H., Mehmood H., Danish S., Alharbi S.A., Ansari M.J., Datta R. Impact of cobalt and proline foliar application for alleviation of salinity stress in radish. *BMC Plant Biology*. 2024; 24: 287. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04998-6>
27. Ragab G.A., Nessem A.A., Elshobary M.E., Henjes J., Razzaky E.O. Unraveling the physiological and ultrastructural responses of wheat to combat cobalt stress and the protective role of *Jania rubens* related to antioxidant defense and cellular integrity. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 16: 1621482. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1621482>
28. Khalid S. *et al.* A Review of Environmental Contamination and Health Risk Assessment of Wastewater Use for Crop Irrigation with a Focus on Low and High-Income Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(5): 895. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050895>
29. Дубков А.А., Тимошинов Р.В., Кушаева Е.Ж., Клыков А.Г. Влияние микроудобрений и регуляторов роста на урожайность сои в условиях Приморского края. *Аграрная наука*. 2023; (11): 93–97. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-93-97>
30. Verma K.K. *et al.* Nanofertilizer Possibilities for Healthy Soil, Water, and Food in Future: An Overview. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 865048. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865048>
31. El-Saadony M.T. *et al.* Role of Nanoparticles in Enhancing Crop Tolerance to Abiotic Stress: A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 946717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946717>
32. Abou El-Nasr M.K. *et al.* The Emerging Roles of Nanoparticles in Managing the Environmental Stressors in Horticulture Crops—A Review. *Plants*. 2025; 14(14): 2192. <https://doi.org/10.3390/plants14142192>
33. Temerbayeva M. *et al.* Technology of Sour Milk Product For Elderly Nutrition. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(1): 291–295. EDN XNJGKT
16. Nile S.H. *et al.* Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022; 20: 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
17. Astafurova T.P. *et al.* Effect of nanoparticles of titanium dioxide and aluminum oxide on some morphophysiological characteristics of plants. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2011; (1): 113–122 (in Russian). EDN NGAZSR
18. Gudkov S.V. *et al.* Laser Ablation-Generated Crystalline Selenium Nanoparticles Prevent Damage of DNA and Proteins Induced by Reactive Oxygen Species and Protect Mice against Injuries Caused by Radiation-Induced Oxidative Stress. *Materials*. 2023; 16(14): 5164. <https://doi.org/10.3390/ma16145164>
19. Burmistrov D.E. *et al.* Bacteriostatic and Cytotoxic Properties of Composite Material Based on ZnO Nanoparticles in PLGA Obtained by Low Temperature Method. *Polymers*. 2022; 14(1): 49. <https://doi.org/10.3390/polym14010049>
20. Yanbaev F.M. *et al.* A Promising Material for Biomedicine and Food Production Based on a Polymethyl Methacrylate-like Resin with Silicon Dioxide Nanoparticles. *Molecules*. 2025; 30(24): 4740. <https://doi.org/10.3390/molecules30244740>
21. Jomova K. *et al.* Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 367: 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173>
22. Singhal R.K. *et al.* Beneficial elements: New Players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*. 2023; 100(2): 237–265. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00843-8>
23. Rui M. *et al.* Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogaea* L.) physiological response and reduce nutritional quality: a life cycle study. *Environmental Science: Nano*. 2018; 5(9): 2088–2102. <https://doi.org/10.1039/C8EN00436F>
24. Khalid S. *et al.* Cobalt in the soil-plant system across deficient, beneficial and toxic levels: data analysis and mechanistic interpretations. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2026; 28(2): 356–383. <https://doi.org/10.1039/D5EM00413F>
25. Noor J. *et al.* Enhancing saline stress tolerance in soybean seedlings through optimal $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios: a coordinated regulation of ions, hormones, and antioxidant potential. *BMC Plant Biology*. 2024; 24: 572. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05294-z>
26. Inayat H., Mehmood H., Danish S., Alharbi S.A., Ansari M.J., Datta R. Impact of cobalt and proline foliar application for alleviation of salinity stress in radish. *BMC Plant Biology*. 2024; 24: 287. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04998-6>
27. Ragab G.A., Nessem A.A., Elshobary M.E., Henjes J., Razzaky E.O. Unraveling the physiological and ultrastructural responses of wheat to combat cobalt stress and the protective role of *Jania rubens* related to antioxidant defense and cellular integrity. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 16: 1621482. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1621482>
28. Khalid S. *et al.* A Review of Environmental Contamination and Health Risk Assessment of Wastewater Use for Crop Irrigation with a Focus on Low and High-Income Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(5): 895. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050895>
29. Dubkov A.A., Timoshinov R.V., Kusaeva E.Zh., Klykov A.G. Influence of micronutrient fertilizers and growth regulators on soybean yield under the conditions of Primorsky Krai. *Agrarian science*. 2023; (11): 93–97 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-93-97>
30. Verma K.K. *et al.* Nanofertilizer Possibilities for Healthy Soil, Water, and Food in Future: An Overview. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 865048. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.865048>
31. El-Saadony M.T. *et al.* Role of Nanoparticles in Enhancing Crop Tolerance to Abiotic Stress: A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 946717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946717>
32. Abou El-Nasr M.K. *et al.* The Emerging Roles of Nanoparticles in Managing the Environmental Stressors in Horticulture Crops—A Review. *Plants*. 2025; 14(14): 2192. <https://doi.org/10.3390/plants14142192>
33. Temerbayeva M. *et al.* Technology of Sour Milk Product For Elderly Nutrition. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(1): 291–295. EDN XNJGKT

34. Горелик В.С., Ребезов М.Б., Горелик О.В., Кныш И.В. Применение хитиновых препаратов для повышения продуктивности коров. *Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии*. 2025; (4): 191–195. <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2025.4.191>

35. Горелик В.С., Ребезов М.Б. Гематологические показатели коров при использовании сукцинат хитозана. *Современные технологии культивирования, переработки и хранения продукции АПК. Сборник тезисов, подготовленный в рамках круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2022; 2: 137–138. EDN JTHLXS

36. Топурия Г.М., Топурия Л.Ю., Корелин В.П., Ребезов М.Б. Ветеринарно-санитарная оценка продуктов убоя утят при применении хитозана. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2014; (3): 95–97. EDN SJDSKL

37. Блинов А.В. и др. Наночастицы селена, стабилизированные хитозаном, для обогащения молочной продукции. *Аграрная наука*. 2024; (9): 130–135. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-130-135>

38. Shukla S.K., Mishra A.K., Arotiba O.A., Mamba B.B. Chitosan-based nanomaterials: A state-of-the-art review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2013; 59: 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.04.043>

39. Domin M. *et al.* Germination Energy and Capacity of Maize Seeds Following Low-Temperature Short Storage. *Sustainability*. 2020; 12(1): 46. <https://doi.org/10.3390/su12010046>

ОБ АВТОРАХ

Андрей Владимирович Блинов¹

кандидат технических наук, доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
blinov.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4701-8633>

Андрей Ашотович Нагдалян¹

кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пищевой и промышленной биотехнологии факультета пищевой инженерии и биотехнологий имени академика А.Г. Храмова
geniando@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Зафар Абдулович Рехман¹

преподаватель департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
zafrehman1027@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2809-4945>

Алина Салмановна Аскерова¹

лаборант Департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
vikalinka04@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9852-3055>

Дмитрий Борисович Голик¹

лаборант Департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
goldy_m@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0008-0663-6305>

Максим Александрович Пирогов¹

ассистент Департамента функциональных материалов и инженерного конструирования
pirogov.m.2002@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9217-6262>

Максим Борисович Ребезов^{2,3}

- доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник²;
- доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов³
rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

¹Северо-Кавказский федеральный университет, ул. им. Пушкина, 1, Ставрополь, 355002, Россия

²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

³Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

34. Gorelik V.S., Rebezov M.B., Gorelik O.V., Knysh I.V. The use of chitin preparations to increase cow productivity. *Legal regulation in veterinary medicine*. 2025; (4): 191–195 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2025.4.191>

35. Gorelik V.S., Rebezov M.B. Hematological parameters of cows using chitosan succinate. *Modern technologies for cultivation, processing, and storage of agricultural products. Abstracts' collection prepared within the framework of the round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2022; 2: 137–138 (in Russian). EDN JTHLXS

36. Topuria G.M., Topuria L.Yu., Korelin V.P., Rebezov M.B. Veterinary-sanitary assessment of slaughter products of ducklings fed chitozan. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2014; (3): 95–97 (in Russian). EDN SJDSKL

37. Blinov A.V. *et al.* Selenium nanoparticles stabilized with chitosan for fortifying dairy products. *Agrarian science*. 2024; (9): 130–135 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-130-135>

38. Shukla S.K., Mishra A.K., Arotiba O.A., Mamba B.B. Chitosan-based nanomaterials: A state-of-the-art review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2013; 59: 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.04.043>

39. Domin M. *et al.* Germination Energy and Capacity of Maize Seeds Following Low-Temperature Short Storage. *Sustainability*. 2020; 12(1): 46. <https://doi.org/10.3390/su12010046>

ABOUT THE AUTHORS

Andrey Vladimirovich Blinov¹

Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Associate Professor, Department of Functional Materials and Engineering Design
blinov.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4701-8633>

Andrey Ashotovich Nagdalyan¹

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Research Laboratory of Food and Industrial Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after Academician A.G. Khramtsov
geniando@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Zafar Abdulovich Rekhman¹

Lecturer at the Department of Functional Materials and Engineering Design
zafrehman1027@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2809-4945>

Alina Salmanovna Askerova¹

Laboratory assistant at the Department of Functional Materials and Engineering Design
vikalinka04@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9852-3055>

Dmitriy Borisovich Golik¹

Laboratory assistant at the Department of Functional Materials and Engineering Design
goldy_m@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0008-0663-6305>

Maksim Alexandrovich Pirogov¹

Assistant at the Department of Functional Materials and Engineering Design
pirogov.m.2002@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9217-6262>

Maksim Borisovich Rebezov^{2,3}

- Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher²;
- Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products³
rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

¹North Caucasus Federal University, 1 Pushkin st., Stavropol, 355002, Russia

²Gorbatov Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin st., Moscow, 109316, Russia

³Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht st., Yekaterinburg, 620075, Russia

УДК 639.3.06:595.371+577.1+664.9

Научный обзор



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-110-119

Н.А. Горбунова¹ ✉

М.Б. Ребезов¹

О.П. Болешенко²

Я.М. Ребезов³

¹Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

²Всероссийский НИИ зерна и продуктов его переработки – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

³Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

✉ n.gorbunova@fnfps.ru

Поступила в редакцию: 12.12.2025

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Горбунова Н.А., Ребезов М.Б., Болешенко О.П., Ребезов Я.М.

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-110-119

Nataliya A. Gorbunova¹ ✉

Maksim B. Rebezov¹

Olga P. Boleshenko²

Yaroslav M. Rebezov³

¹Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

²All-Russian Scientific Research Institute of Grain and its Processed Products – Branch of Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

³Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

✉ n.gorbunova@fnfps.ru

Received by the editorial office: 12.12.2025

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Gorbunova N.A., Rebezov M.B., Boleshenko O.P., Rebezov Ya.M.

Возможности использования артемии (Обзор, часть 1)

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Представлен обзор *Artemia spp.* (артемии) как биологического ресурса с широким спектром применения. Рассматривается культивация и рынок производства артемии.

Методы. Поиск потенциально релевантных статей производили по ключевым словам в электронных базах на русском и иностранных языках.

Результаты. Артемия присутствует в водоемах Северной и Южной Америки, Африки, Австралии, Азии и Европы. Содержит хорошее количество белка, незаменимых аминокислот и жирных кислот, чтобы быть потенциальной кормовой или биологически активной добавкой. Химический состав артемии зависит от температуры, солености, кислорода и корма. Среди лидеров производства – США, Китай, Россия и Казахстан. Наибольший потенциал имеют ресурсы цист артемии расположенные в Центральной и Юго-Восточной Азии..

Ключевые слова: артемия, *Artemia spp.*, аквакультура, рынок артемии, функциональные и технологические свойства

Для цитирования: Горбунова Н.А., Ребезов М.Б., Болешенко О.П., Ребезов Я.М. Возможности использования артемии (Обзор, часть 1). *Аграрная наука*. 2026; 405(04): 110–119.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-110-119>

Possibilities of using Artemia (Review, Part 1)

ABSTRACT

Relevance. This article presents an overview of *Artemia spp.* (Artemia) as a biological resource with a wide range of applications. The cultivation and production market for Artemia are discussed.

Methods. A search for potentially relevant articles was conducted using keywords in Russian and foreign language electronic databases.

Results. Artemia is found in waters of North and South America, Africa, Australia, Asia, and Europe. Artemia contains a good amount of protein, essential amino acids, and fatty acids, making it a potential feed or biologically active supplement. The chemical composition of Artemia depends on temperature, salinity, oxygen, and feed. Leading producers include the United States, China, Russia, and Kazakhstan. Artemia cyst resources located in Central and Southeast Asia have the greatest potential.

Key words: Artemia, *Artemia spp.*, aquaculture, Artemia market, functional and technological properties

For citation: Gorbunova N.A., Rebezov M.B., Boleshenko O.P., Rebezov Ya.M. Possibilities of using Artemia (Review, Part 1). *Agrarian science*. 2026; 405(04): 110–119 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-110-119>

Введение/Introduction

Развитие аквакультур предоставляет возможности для борьбы с голодом, недоеданием и нищетой, содействуя экономическому развитию и более эффективному использованию природных ресурсов, что способствует достижению ряда целей устойчивого развития Организации Объединенных Наций, таких как ликвидация голода, обеспечения продовольственной безопасности и улучшение питания¹.

Одной из таких стратегий, направленных на реализацию этих целей является улучшение качества кормов и программ кормления, входящих в рацион животных и определяющих качество и безопасность пищевой продукции. К таким нетрадиционным высокопитательным и биологически полноценным кормовым добавкам относятся цисты артемий [1].

Артемия — это собирательное название водных ракообразных рода *Artemia*. Рачок *Artemia salina* — это ракообразное семейства *Artemiidae*, обитающее в лиманах и соленых озерах по всему миру. Он впервые был описан шведским ученым Карлом Линнеем в 1758 году. За годы исследований выяснилось, что рачок обладает уникальными особенностями, которые не присущи другим особям его семейства. Из-за необычного строения тела и биологических особенностей артемия стала объектом многочисленных исследований, проводившихся не только на земле, но и в космосе [1–3].

Артемия известна и используется людьми на протяжении веков. Отсюда ее многочисленные популярные названия, такие как «креветка в рассоле», «соленая креветка», «Фецзан-вурм» («Fezzan Wurm»), «Бахар-эль-дуд» («Bahar-el-dud») и др., однако ее использование в качестве корма при выращивании личиночных организмов началось только в 1930-х годах, когда ряд исследователей обнаружили, что она является отличным кормом для мальков рыб, осуществив первый прорыв в выращивании коммерчески важных

видов рыб [4]. В дальнейшем использование артемии получило более широкое распространение из-за удобства ее использования и из-за питательной ценности [5].

Тот факт, что спящие цисты артемии могут храниться, сохраняя жизнеспособность в течение длительного периода, в условиях обезвоживания и дефицита кислорода, а затем использоваться в качестве готового корма, требующего инкубации всего через 24 часа, делает их наиболее удобным и наименее трудоемким живым кормом, доступным для аквакультуры [6]. Пищевая ценность артемии непостоянна, а варьируется из-за географических и сезонных факторов [1].

В последнее время артемии также стали активно использоваться в животноводстве, медицине, парфюмерной и других отраслях промышленности.

Целью работы стал анализ использования артемии в аквакультуре и других областях жизнедеятельности человека.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Настоящий обзор направлен на анализ применения артемии в разных областях жизнедеятельности.

Для достижения этой цели были отобраны публикации, содержащие систематизированные данные, представленные в научных статьях, опубликованных на иностранных и русском языках с января 1970 по ноябрь 2025 гг. в базах Google Scholar², Science Direct³, eLibrary⁴ — Базе данных (РИНЦ), Scopus⁵, PubMed⁶.

Отобранные статьи были проанализированы, чтобы выявить и возможности использования артемии.

Научный обзор разделен на 2 части. Первая часть посвящена культивированию и функциональным особенностям артемии, а вторая — возможностям применения артемии в промышленности (таблица 1).

Таблица 1. Структура научного обзора «Возможности использования артемии»

Table 1. Structure of the scientific review «Possibilities of using Artemia»

Номер части научного обзора	Наименование раздела научного обзора	примечание
1	1. Особенности артемии	–
	2. История культивирования артемий и современное состояние рынка	
	3. Функциональные и технологические свойства артемии	
2	4. Использование артемии в качестве корма для аквакультур	Часть 2 научного обзора будет опубликована в следующем номере журнала «Аграрная наука»
	5. Питательная ценность артемии. Влияние обогащения.	
	6. Другие направления использования артемий	

¹ URL: https://www.un.org/ru/mdg/youth_version/

³ URL: <https://scholar.google.com/>

³ URL: <https://www.sciencedirect.com/>

⁴ URL: <https://elibrary.ru/>

⁵ URL: <https://www.elsevier.com/products/scopus>

⁶ URL: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov

Результаты и обсуждение /

Results and discussion

Часть 1.

1. Особенности артемии

Уникальные по физико-химическим, свойствам соленые водоемы не являются безжизненными — их биота представлена специфическими галофильными формами, замыкающим трофическим звеном в гипергалинных экосистемах является жаброногий рачок артемия [1].

Артемии (*Artemia*) — род ракообразных, относящийся к одной из наиболее примитивных современных групп ракообразных, называемой жаброногами (*Branchiopoda*). Сегодня известны 5 видов этого рачка, которые широко распространены в пределах степных и полупустынных зон Америки, Европы и Азии, где обитают в морских осолоненных лиманах и соленых материковых озерах. Все виды артемии считаются лучшим стартовым кормом для личинок рыб и других гидробионтов [7]. Цисты артемии в естественных экосистемах являются объектом интенсивного промысла [1, 6].

Артемия — это микро-ракообразное, хорошо приспособленное к суровым условиям гиперсоленой среды. Адаптация к этим условиям происходила на различных функциональных уровнях или доменах, от индивидуального (молекулярно-клеточно-физиологического) до популяционного уровня. В таких условиях живут очень немногие эквивалентные макропланктонные организмы; таким образом, артемию можно считать образцовым животным-экстремофилом, предлагающим уникальный набор адаптаций, которые находятся в центре внимания данного обзора.

Наиболее очевидной является высокоэффективная система осморегуляции, способная выдерживать концентрацию соли, в 10 раз превышающую концентрацию обычной морской воды. В чрезвычайно критических условиях окружающей среды, например, когда сезонные озера пересыхают, артемия находит убежище, продуцируя высокоустойчивый эмбрион гастролы, способный к сильному обезвоживанию, что позволяет избежать вымирания популяции. Цисты можно рассматривать как банк генов, хранящий генетическую память об исторических условиях популяции. Их возникновение обусловлено эволюционировавшей способностью самок «воспринимать» предстоящие нестабильные условия окружающей среды, выражающейся в их способности переключать репродуктивный режим, производя либо цисты (яйцеклад),

когда условия окружающей среды становятся неблагоприятными, либо свободно плавающих науплиев (яйцехвородящих), которые способны поддерживать популяцию в подходящих условиях [8].

Важнейшей адаптацией, обеспечившей эволюционный успех артемии, является уникальная репродуктивная стратегия, включающая два пути: живорождение (в благоприятных условиях) и откладку цист (при стрессе). Цисты, способные десятилетиями переносить экстремальные условия (высыхание, замораживание, аноксию), являются основой для их коммерческого использования [2].

Жизненный цикл Артемии представлен на рисунке 1⁷.

За исключением Антарктиды, *Artemia spp.* являются наиболее распространенными и многочисленными животными в гиперсоленых водах по всему миру [9]. Они принадлежат к *Anostraca*, самой примитивной и древней группе среди ныне живущих ракообразных, и обладают одной из самых совершенных систем осморегуляции среди всех животных, что позволяет им существовать в чрезвычайно широком диапазоне солености. Благодаря этому они играют ключевую многоплановую роль в большинстве экосистем с гиперсолеными водами планеты [8, 9].

Ракообразные рода *Artemia* характеризуются чрезвычайно широким глобальным распространением. Их ареал охватывает разнообразные соленые водоемы по всему миру — от прибрежных морских участков до внутренних материковых озер. Согласно современным данным, существует свыше 900 природных

Рис. 1. Жизненный цикл Артемии⁷

Fig. 1. Life cycle of Artemia⁷



⁷ URL: <https://www.aqvium.ru/126-rachki-artemii-opisanie-i-zhiznennyj-tsikl>

местообитаний артемии, из которых более 110 расположены на территории России [10, 11]. Ареал рачков приурочен к аридной и полуаридной климатическим зонам. В географическом отношении артемиевые водоемы расположены между 56° с. ш. и 55° ю. ш. В России она в основном встречается в озерах Западной Сибири, а также в Крыму, Калмыкии и некоторых других регионах страны. В Западной Сибири насчитывается около 100 артемиевых озер общей площадью более 1 600 км². Сбор цист в год производится только в 20-40 озерах [11]. Van Starren *et al.* в своей книге перечислил 20 озер артемии на территории России, 18 из которых расположены в Сибири [12].

Артемия присутствует в водоемах Северной и Южной Америки, Африки, Австралии, Азии и Европы. В мире существует по меньшей мере 600 засоленных биотопов, пригодных для поддержания роста популяции артемии. Эти биотопы расположены в 66 странах, расположенных в умеренных и прибрежных регионах мира [2].

Виды артемии обладают выраженной географической приуроченностью. *Artemia persimilis Piccinelli & Prosdocimi, 1968* является эндемиком водоемов Южной Америки. *Artemia franciscana Kelog, 1906*, естественный ареал которой охватывает Северную и Южную Америку, была интродуцирована человеком и теперь встречается также в прибрежных соленых водоемах Юго-Восточной Азии и Австралии. *Artemia salina Linnaeus, 1758* распространена в Средиземноморье, *A. urmiana Gunther, 1900* — в водоемах Ирана и Крыма, *A. sinica Yaneng, 1989* — в Центральной и Восточной Азии, *A. tibetiana Abatzopoulos, Zhang, Sorgeloos,*

1998 — в Тибете. При этом для восточного полушария, включая территорию России, характерно преобладание партеногенетических популяций, которые условно объединяются под названием *Artemia parthenogenetica Barigozzi, 1974* [11].

Местообитания артемии включают континентальные (озера) и морские (лиманы) водоемы, где соленость воды варьирует в широком диапазоне — от 20,0 до 340,0 граммов на литр [13]. Природная встречаемость артемии лимитируется биотопами, в которых соленость всегда достаточно высокая для хищников или где низкая температура рапы также препятствует развитию хищников и гарантирует неметаболическое состояние гидратированных цист (состояние диапаузы).

Артемия — уникальный организм, поскольку она живет в экстремальных условиях, где другие организмы (за исключением некоторых галофильных бактерий и водорослей) выжить не могут [11].

Артемия обладает высокими адаптивными свойствами, способна существенно изменять морфологические признаки и, в особенности, биохимический состав в зависимости от условий местообитания, качества кормовой базы и сезона сбора.

Учитывая данные особенности, а также доступность местного сырья, возникает необходимость в детальном и сравнительном исследовании его химического состава и оценке потенциала в качестве источника природных нутрицевтиков [14].

Исследовав особенности артемии, можно выделить некоторые ключевые аспекты ее значимости для жизнедеятельности человека (таблица 2)⁸ [2, 15].

Таблица 2. Особенности ракообразных рода *Artemia*

Table 2. Characteristics of crustaceans of the genus *Artemia*

Аспект	Ключевые характеристики ракообразных рода <i>Artemia</i>	Научная значимость
Таксономия	Род ракообразных класса Жабронogie (<i>Branchiopoda</i>), отряда Бесщитковые (<i>Anostraca</i>).	Относится к эволюционно древней, примитивной группе, что делает её ценным объектом для сравнительной морфологии и эволюционной биологии.
Морфология	Сегментированное тело, разделённое на голову, грудь (с 11 сегментами) и брюшко. На голове — фасеточные глаза и науплиальный глаз. Грудные конечности листовидной формы.	—
Физиология	Выдающаяся осморегуляторная способность. Может обитать в воде с солёностью от 10 до 300–350‰. Способность к криптобиозу (ангидробиозу) на стадии цисты.	Солевые железы в грудных ножках активно выводят ионы. Цисты в состоянии ангидробиоза выдерживают экстремальные температуры, радиацию, вакуум.
Репродукция	Чередование полового и партеногенетического размножения. Два типа репродукции: живорождение (науплиусы) и откладка цист (покоящихся яиц).	Позволяет быстро заселять водоёмы. Цисты — адаптация к пересыханию водоёмов и гарантия выживания популяции.
Экология	Облигатный обитатель гипергалинных (сильносоленых) водоёмов. Ключевой звено пищевой цепи: фильтратор фитопланктона и детрита, корм для птиц и рыб.	Отсутствие конкурентов и хищников (кроме водоплавающих птиц) в условиях высокой солёности. Биоиндикатор состояния солёных вод.
Питание	Пассивный фильтратор. Пропускает через фильтрационный аппарат на конечностях взвешенные частицы (микроскопические водоросли, бактерии, детрит).	Высокая эффективность усвоения, определяющая быстрый рост биомассы в оптимальных условиях.
Хозяйственное значение	Стартовый корм в аквакультуре (науплии). Ценный биологический ресурс (цисты, биомасса). Модельный объект в токсикологии, космической биологии, исследованиях стресса.	Высокая питательная ценность, удобство хранения (цисты), контролируемый выклев, оптимальный размер для личинок рыб.

⁸ Литвиненко Л.И., Мамонтов Ю.П., Иванова О.В., Литвиненко А.И., Чебанов М.С. Инструкция по использованию артемии в аквакультуре. Тюмень : СибрыбНИИпроект, 2000; 59 с. <https://www.elibrary.ru/tfdpph>

2. История культивирования артемии и современное состояние рынка

Несмотря на то, что артемия была знакома человеку на протяжении столетий, ее целенаправленное применение в качестве корма для личинок объектов аквакультуры началось лишь в 1930–1940-х годах.

Первые практические опыты по сбору цист этого рачка были проведены на Большом Соленом озере (США). Объемы первых заготовок цист составляли около 16 т.

Постепенно с ростом объемов аквакультуры возрастала потребность в артемии. При этом иногда спрос на цисты превышал предложение, что вызвало рост цен на этот продукт [16].

Однако Большое Соленое озеро, будучи основным источником, оказалось ненадежным поставщиком цист: объемы их заготовки сильно колебались из-за изменений в окружающей среде. Это заставило искать альтернативные источники. В середине 1950-х годов в заливе Сан-Франциско впервые попытались выращивать артемию специально для получения цист. Здесь их стали добывать как побочный продукт на солеварнях, где можно было контролировать испарение и, следовательно, соленость воды. Специалисты бельгийского Референтного центра «Артемия» предложили метод заселения науплиями соленых прудов и солеварен для получения дополнительной продукции — цист и биомассы. Этот метод успешно применили в странах Юго-Восточной Азии [17].

Мировое развитие артемии напрямую связано с увеличением спроса на цисты. Этот спрос, в свою очередь, стимулируется общим динамичным ростом аквакультурной отрасли [10].

Цисты и биомассу артемии можно добывать экстенсивно — почти естественным путем на солеварнях с минимальным вмешательством, либо выращивать интенсивно. Интенсивное культивирование наиболее успешно развито в Юго-Восточной Азии. Первые проекты Вьетнама в дельте Меконга начались уже в 1980-х, и к 2001 году под

производство было занято свыше 1000 га соляных полей, хорошо приспособленных к местной сильной жаре [18]. Этот регион в настоящее время является важным поставщиком высококачественных цист как для внутреннего использования, так и для международного рынка.

Производство артемии методами аквакультуры существует также в Австралии, на Багамских островах, Мадагаскаре, Перу, США, Иране, Китае и других странах [10]. Исторический путь добычи артемии представлен в таблице 3 [2, 13, 15, 16].

По оценке исследователей, наибольший коммерческий потенциал имеют ресурсы цист артемии расположенные в основном в Центральной Азии: например, озеро Урмия в Иране, озеро Айби в КНР, Большое Яровое в Сибири (Алтайский край), несколько озер в Казахстане, Кара-Богаз-Гол в Туркменистане и соленые озера в Аргентине [19].

Объем мирового рынка артемии в 2024 году составлял около 148,29 млн долларов США, и прогнозируется, что к 2034 году он вырастет примерно до 298,65 млн долларов США при среднегодовом темпе роста около 9,38% в период с 2025 по 2034 год^{9, 10}.

В 2024 году цены на самые востребованные товарные позиции — сухие и сырые цисты артемии — достигли рекордных уровней, составив 37,1 \$/кг (+28% к 2022 году) и 16,4 \$/кг (+46%) соответственно. Однако в 2025 году наблюдается снижение цен, вызванное профицитом предложения¹¹.

В мировом производстве артемии лидирует США (штат Юта, Великое Солёное озеро) — 1000–2000 т. Объем производства Китая составляет 800–1400 т. Основные места добычи: высокогорные соленые озера Тибета (Цинхай) и Внутренней Монголии. Объем производства России — 300–700 т. Крупнейшим месторождением является озеро Бурлинское (Алтайский край). Также активна добыча на озерах в Забайкалье. Объем производства Казахстана — 150–400 т. Добывается порядка 20 т. в Узбекистане, 20 т. во Вьетнаме, 30–150 т.

Таблица 3. История культивирования Артемии

Table 3. History of artemia cultivation

Период	Ключевые события
До 1930-х гг.	Стихийный сбор цист в естественных гипергалинных водоемах. Использование в качестве корма для декоративных рыб.
1930–1950-е гг.	Начало коммерческого использования в аквакультуре. Первые исследования по массовому выклевыванию цист для кормления личинок рыб.
1960–1980-е гг.	Интенсификация поиска и эксплуатации новых месторождений цист. Становление глобального рынка Артемии.
1990–2000-е гг.	Кризис из-за колебаний урожая цист в природе. Развитие технологии интенсивного прудового культивирования (Вьетнам, Китай, Таиланд).
2010–2025 гг.	Основные страны-поставщики: США и Китай.

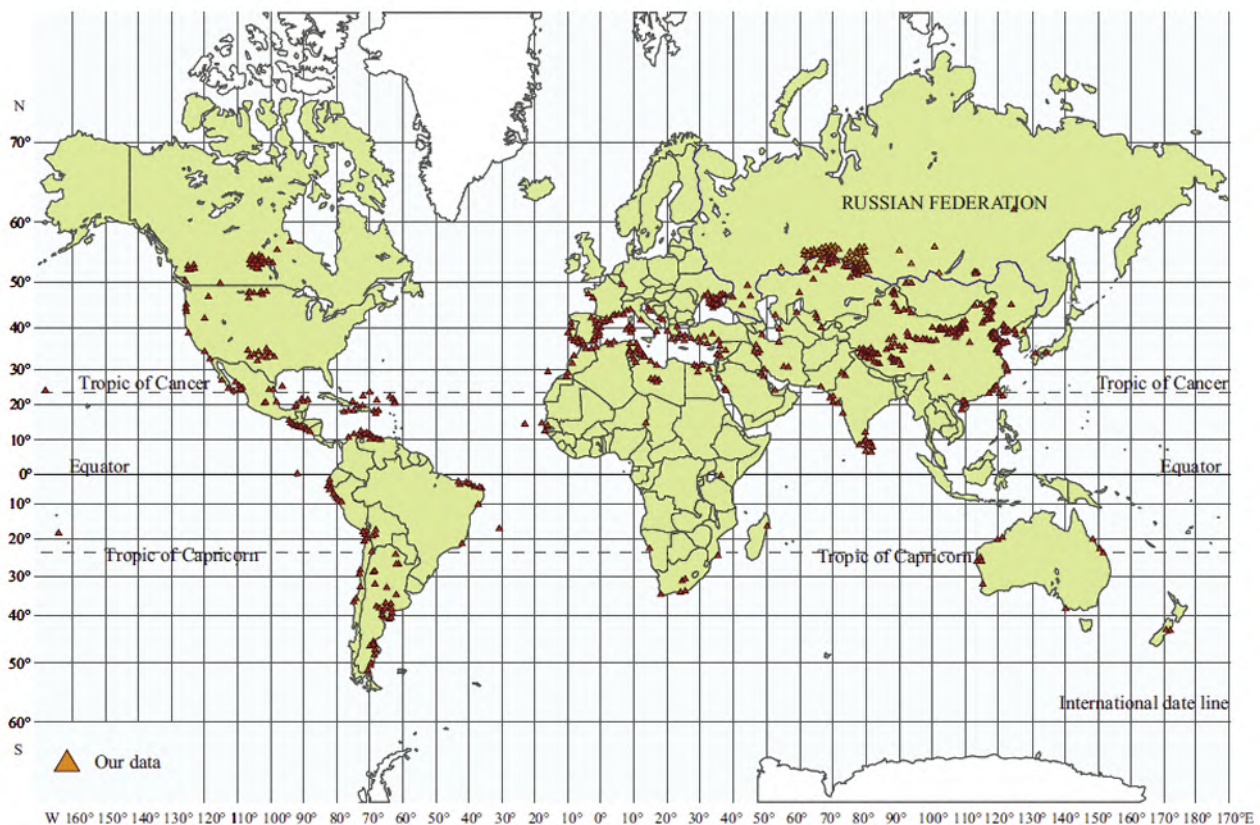
⁹ Artemia Industry Perspective.

URL: <https://www.zionmarketresearch.com/report/artemia-market>

¹⁰ URL: <https://www.accio.com/business/trend-of-artemia-cysts>

¹¹ Снижение цен на продукцию из артемии: анализ текущей ситуации на мировом рынке.

<https://dalekayaokraina.ru/news/rybnaya-otrasl/snizhenie-tsen-na-produktsiyu-iz-artemii-analiz-tekushchey-situatsii-na-mirovom-rynke/>

Рис. 2. Распределение Артемии по миру [11]**Fig. 2.** Distribution of Artemia around the world [11]

В остальных странах (Таиланд, Аргентина, Бразилия и другие соленые пруды, и озера мира). В общей сложности, в среднем добывается от 3050 до 4050 т.^{12, 13} [11, 20] (рис. 2).

Основным мировым рынком цист артемии является Юго-Восточная Азия. Такие страны, как Китай, Индия, Вьетнам и Индонезия, вкладывают значительные средства в инфраструктуру и производство аквакультуры, что подпитывает спрос на артемию как на критически важную проблему в кормах для аквакультуры. Идеальные климатические условия региона для выращивания артемии, наряду с растущим пониманием необходимости высококачественных кормов для аквакультуры, способствуют ожидаемому лидерству Азиатско-Тихоокеанского региона на рынке артемии. Помимо различных видов рыб, здесь выращиваются миллионы тонн креветок, в корм которым идет большая часть всех живых стартовых кормов⁸ [10].

Общий объем экспорта продукции из артемии России в 2024 г. составил около 703 т.⁹. Крупнейшим регионом добычи является Алтайский край, на озера этого региона приходится более 60% официально добываемых в России цист артемии. Свыше 90% российского экспорта артемии приходится на КНР и Таиланд. При этом

внутренний спрос на живые стартовые корма не превышает 3–5% от общего объема производства [10].

3. Функциональные и технологические свойства артемии

Следует отметить, что химический состав цист, собранных в одном водоеме, но в разные годы, может различаться [21].

Химический состав артемии зависит от температуры, солености, кислорода и корма. Поэтому рачки из разных мест имеют разный состав и, соответственно, разную кормовую ценность. При ее оценке ключевыми являются липиды, так как они служат для культивируемых организмов источником энергии и строительным материалом. [21, 22].

Литературные данные о приблизительном составе науплиев сильно разнятся, варьируя от 37 до 71% белков, от 12 до 30% жиров, от 11 до 23% углеводов и от 4 до 21% золы. Значения для взрослых артемий составляют от 50 до 69% белков, от 2 до 19% жиров, от 9 до 17% углеводов и от 9 до 29% золы [23].

При оценке питательной ценности науплий важная роль отводится липидам [24], которые служат в качестве пластического и

¹² URL: <https://www.globalseafood.org/advocate/the-state-of-the-artemia-cyst-market/>

¹³ URL: <https://wildlife.utah.gov/gslp/harvests/totals.html>

энергетического материала у гидробионтов. Приоритет отдается ненасыщенным жирным кислотам. У большей части животных жирные кислоты ω_3 и ω_6 , в частности линолевая (18:2 ω_6) и α -линоленовая (18:3 ω_3), из-за генетически обусловленного отсутствия ферментов, необходимых для их синтеза [25], являются эссенциальными, поскольку поступают только с пищей [26]. У пресноводных рыб эссенциальными жирными кислотами являются 18:2n-6 и 18:3n-3 [27], они должны составлять не менее 1% суточного рациона.

Свежевыловленная артемия содержит большое количество белка, незаменимых аминокислот и жирных кислот [28]. Так, цисты артемии из озера Эбейты (Омская область) имеют следующий химический состав: белок — 33,5%, кальция — 0,1%, фосфор — 0,54%, натрий — 0,97%. Цисты имеют хороший аминокислотный профиль: общее содержание 16 основных аминокислот — 35,83%, в том числе аспарагиновая кислота — 3,52%, глутаминовая — 5,21%, серин — 2,40%, гистидин — 1,84%, глицин — 2,19%, треонин — 1,81%, аргинин — 2,26%, аланин — 2,25%, тирозин — 2,03%, валин — 1,77%, фенилаланин — 1,59%, изолейцин — 1,34%, лейцин — 2,71%, лизин — 3,22%, цистин — 0,72%, метионин — 0,97%. [29].

Цисты артемии содержат значительное количество липидов, однако их качественный состав варьирует. В частности, в цистах рачков из водоемов Италии преобладают триацилглицерины, в то время как в цистах из Большого Соленого озера (Юта, США) доминируют фосфолипиды и стеролы. В процессе онтогенеза липидный профиль артемии также претерпевает изменения: содержание жирных кислот возрастает по мере развития рачка: от 490–704 мг/г липидов в цистах до 602–854 мг/г липидов у науплиев [21].

Были проведены исследования по биообогащению цист, декапсулированных яиц и науплиев артемии биологически активными веществами и конопляным маслом. Обогащающий комплекс включал пробиотик на основе *Bacillus subtilis*, продуцирующий полиеновые антибиотики, адаптоген «Иркутин», витаминно-аминокислотный комплекс «Чиктоник», а также конопляное масло с высоким содержанием линолевой кислоты (50–70%) и линоленовых кислот (15–25%) [7].

Обогащение артемии на разных стадиях развития комплексом биологически активных веществ резко увеличило в науплиях, яйцах и цистах содержание важнейших жирных кислот — Омега-3 (эйкозапентаеновой, докозагексаеновой, линоленовой) и Омега-6 (линолевой,

арахидоновой). Это значительно повысило их биологическую и пищевую ценность при использовании в качестве стартовых кормов для мальков рыб¹⁴ [7].

Был исследован биохимический состав цист артемии из гиперсоленых озер Алтайского края, используемых в качестве корма для мальков рыб. Озера имели разную соленость и отличались по химическому составу. Проведено изучение биохимического состава цист артемии по количеству заменимых и незаменимых аминокислот, по жирным кислотам, минералам и витаминам, существенных различий выявлено не было. В исследованных образцах заменимых аминокислот было больше в цистах из Озера Малое Яровое и Душное. Среди незаменимых аминокислот наибольшее количество лизина было обнаружено в образцах из озер Душное (4,43%), Большой Родник (4,28%) и Кулундинское (4,01%). Цисты из озера Сушне имеют наибольшее содержание заменимых (серин — 1,92%, глицин — 2,04%, пролин — 4,51%) и незаменимых аминокислот (метионин — 2,23%, лизин — 4,44%), т.е. являются более полноценным исходным кормом. Возможно, это связано с повышенным содержанием калия в рассоле озера [30].

Сравнительный анализ показал, что олеиновая жирная кислота в наибольшем количестве содержится в образцах озера Душное (1,61%), линолевая — в озере Большое Яровое (0,93%), линоленовая кислота в образцах озера Малиновое и составляет 1,8%. Изучение минерального состава и витаминов показало, что в образцах цист из озера Кулунда максимальное содержание: кальция (7,43%), меди (1,88%) и цинка (13,1%). Фосфор в наибольшем количестве содержится в пробах озера Малое Яровое (6,9%); Марганец — в образцах озера Малое Яровое и Душное (3,79% и 3,93% соответственно) [30].

Ученые Узбекистана провели исследования макро- и микронутриентного состава цист *Artemia parthenogenetica* Аральского моря. Анализ показал следующее содержание основных компонентов: общий белок — 49,2%, жиры — 15,8%, углеводы — 30,6%. Установлено высокое содержание незаменимых макро- (K, Ca, Mg, Na, P) и микроэлементов (Fe, Zn, Se). Токсичные элементы, такие как кадмий, свинец и мышьяк, присутствуют в количествах, не превышающих допустимые нормы (либо отсутствуют).

Таким образом, цисты артемии Аральского моря, представленные в виде мукообразного порошка, могут служить сырьевой основой для производства нутрицевтиков. [14].

¹⁴ Ядрищенская О.А. Влияние различных доз и технологии обработки цист артемии на продуктивность цыплят бройлеров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук по специальности 06.02.02 – кормление сельскохозяйственных животных и технология кормов. Омск, 2005; 24 с.

Рис. 3. Основные выводы по первой части научного обзора**Fig. 3.** Main conclusions of the first part of the scientific review

Выводы/Conclusions

Проведенный анализ научного обзора позволял сформулировать следующие основные выводы, представленные на рис. 3.

Первая часть научного обзора комплексно освещает биолого-экологические особенности артемии, историю становления ее промысла и современное состояние мирового рынка, а также детально анализирует факторы, влияющие на ее

функционально-технологические и питательные свойства.

Представленные данные обосновывают значимость артемии как стратегического биологического ресурса для аквакультуры и смежных отраслей. Во второй части обзора будет проведен анализ практического применения артемии в качестве корма, а также в других инновационных направлениях (нутрицевтики, биомедицина и др.).

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Научный обзор подготовлен в рамках выполнения исследований по государственному заданию Научно-исследовательских работ № FGUS-2024-0002 Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук.

FUNDING

This scientific review was prepared as part of the research carried out under the state assignment for scientific research work No. FGUS-2024-0002 of the V. M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van Stappen G., Sorgeloos P., Rombaut G. (eds.). Manual on *Artemia* production and use. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 702. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2024; xviii, 190. ISBN 978-92-5-138692-7 <https://doi.org/10.4060/cd0313en>
2. Criel G.R.J., Macrae T.H. *Artemia* Morphology and Structure. In: Abatzopoulos, T.J., Beardmore, J.A., Clegg, J.S., Sorgeloos, P. (eds) *Artemia: Basic and Applied Biology*. Dordrecht: Springer. 2002; 1–37. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0791-6_1

REFERENCES

1. Van Stappen G., Sorgeloos P., Rombaut G. (eds.). Manual on *Artemia* production and use. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 702. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2024; xviii, 190. ISBN 978-92-5-138692-7 <https://doi.org/10.4060/cd0313en>
2. Criel G.R.J., Macrae T.H. *Artemia* Morphology and Structure. In: Abatzopoulos, T.J., Beardmore, J.A., Clegg, J.S., Sorgeloos, P. (eds) *Artemia: Basic and Applied Biology*. Dordrecht: Springer. 2002; 1–37. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0791-6_1

3. Москвово В.Е., Набокина А.А., Геворгян Т.А., Пахлеванян А.А., Осипова Е.М. Динамика роста и развития жаброногого рачка (*Artemia Salina*) при кормлении живыми и сухими кормами. *Водные биоресурсы: рациональное освоение и искусственное воспроизводство. Материалы Международной научно-практической конференции*. Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет. 2021; 127–132. EDN HLOUSV
4. Clegg J.S., Trotman C.N.A. Physiological and Biochemical Aspects of *Artemia* Ecology. In Abatzopoulos Th.J., Beardmore J.A., Clegg J.S., Sorgeloos P. (eds.). *Artemia: Basic and Applied Biology*. Dordrecht: Springer. 2002; 129–170. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0791-6_3
5. Azra M.N., Noor M.I.M., Burlakovs J., Abdullah M.F., Abd Latif Z., Yik Sung Y. Trends and New Developments in *Artemia* Research. *Animals*. 2022; 12(18): 2321. <https://doi.org/10.3390/ani12182321>
6. Веснина Л.В., Клепиков Р.А., Пищенко Е.В., Морузи И.В. Продуктивность цист рачка *Artemia* leach, 1819 в гипергалинных озерах Алтайского края. Монография. Новосибирск: *Золотой колос*. 2021; 147. ISBN 978-5-94477-297-8 EDN LLIVWM
7. Романова Е.М., Шленкина Т.М., Романов В.В., Фазиров Э.Б. Жирнокислотный состав артемии при обогащении биологически активными веществами. *Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии*. 2023; (1): 168–174. EDN LKSIEU
8. Gajardo G.M., Beardmore J.A. The Brine Shrimp *Artemia*: Adapted to Critical Life Conditions. *Frontiers in Physiology*. 2012; 3: 185. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00185>
9. Lantushenko A., Meger Y., Gadzhi A., Anufrieva E., Shadrin N. *Artemia* spp. (Crustacea, Anostraca) in Crimea: New Molecular Genetic Results and New Questions without Answers. *Water*. 2022; 14(17): 2617. <https://doi.org/10.3390/w14172617>
10. Ковачева Н.П., Литвиненко Л.И., Саенко Е.М., Жигин А.В., Кряхова Н.В., Семик А.М. Современное состояние и перспективы развития аквакультуры артемии в России. *Труды ВНИРО*. 2019; 178: 150–171. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2019-178-150-171>
11. Litvinenko L.I., Litvinenko A.I., Boiko E.G., Kutsanov K. *Artemia* cyst production in Russia. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2015; 33(6): 1436–1450. <http://doi.org/10.1007/s00343-015-4381-6>
12. Van Stappen G., Litvinenko L.I., Litvinenko A.I., Boyko E.G., Marden B., Sorgeloos P. A Survey of *Artemia* Resources of Southwest Siberia (Russian Federation). *Reviews in Fisheries Science*. 2009; 17(1): 116–148. <https://doi.org/10.1080/10641260802590095>
13. Соловов В.П., Подуровский М.А., Ясюченя Т.Л. Жаброног артемия: история и перспективы использования ресурсов. Барнаул. 2001; 144. ISBN 5-85458-020-9 EDN NCXJOK
14. Хажибаяев К.Г., Бердимбетова Г.Е., Карлыбаева Б.П., Ощепкова Ю.И. Изучение макро и микронутриентов цист артемии Аральского моря. *Universum: химия и биология*. 2019; (9): 19–24. EDN IKWYPW
15. Литвиненко Л.И., Литвиненко А.И., Бойко Е.Г. Артемия в озерах Западной Сибири. Новосибирск: *Наука*. 2009; 304. ISBN 978-5-02-023274-7 EDN QKSWNZ
16. Kouba A., Hamáčková J., Buřič M., Polícar T., Kozák P. Use of three forms of decapsulated *Artemia* cysts as food for juvenile noble crayfish (*Astacus astacus*). *Czech Journal of Animal Science*. 2011; 56(3): 114–118. <https://doi.org/10.17221/1301-CJAS>
17. Lavens P., Sorgeloos P. Design, operation, and potential of a culture system for the continuous production of *Artemia* nauplii. Sorgeloos P., Bengtson D.A., Decler W., Jaspers E. (eds.). *Artemia research and its applications. Proceedings of the Second International Symposium on the brine shrimp Artemia*. Wetteren, Belgium: Universa Press. 1987; 3: 339–345.
18. Nguyen P.V., Huang C.T., Truong K.H., Hsiao Y.J. Profitability improvement for brine shrimp *Artemia franciscana* commercial farming in coastal saltworks in the Mekong Delta, Vietnam: A bioeconomic analysis. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2020; 51(4): 896–917. <https://doi.org/10.1111/jwas.12667>
19. Lavens P., Sorgeloos P. The history, present status and prospects of the availability of *Artemia* cysts for aquaculture. *Aquaculture*. 2000; 181(3–4): 397–403. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00233-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00233-1)
3. Moskovko V.E., Nabokina A.A., Gevorgyan T.A., Pakhlevanyan A.A., Osipova Ye.M. Comparative characteristics of growth rates of gilded crushies (*Artemia Salina*) based on the use of live and dry feeds. *Aquatic bioresources: rational development and artificial reproduction. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Vladivostok: Far Eastern State Technical Fisheries University. 2021; 127–132 (in Russian). EDN HLOUSV
4. Clegg J.S., Trotman C.N.A. Physiological and Biochemical Aspects of *Artemia* Ecology. In Abatzopoulos Th.J., Beardmore J.A., Clegg J.S., Sorgeloos P. (eds.). *Artemia: Basic and Applied Biology*. Dordrecht: Springer. 2002; 129–170. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0791-6_3
5. Azra M.N., Noor M.I.M., Burlakovs J., Abdullah M.F., Abd Latif Z., Yik Sung Y. Trends and New Developments in *Artemia* Research. *Animals*. 2022; 12(18): 2321. <https://doi.org/10.3390/ani12182321>
6. Vesnina L.V., Klepikov R.A., Pishchenko Ye.V., Moruzi I.V. Cyst productivity of the crustacean *Artemia* leach, 1819 in hypersaline lakes of Altai Krai. Monograph. Novosibirsk: *Zolotoy kolos*. 2021; 147 (in Russian). ISBN 978-5-94477-297-8 EDN LLIVWM
7. Romanova E.M., Shlenkina T.M., Romanov V.V., Fazirov E.B. Fatty acid composition of *Artemia* when enriched with biologically active substances. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2023; (1): 168–174 (in Russian). EDN LKSIEU
8. Gajardo G.M., Beardmore J.A. The Brine Shrimp *Artemia*: Adapted to Critical Life Conditions. *Frontiers in Physiology*. 2012; 3: 185. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00185>
9. Lantushenko A., Meger Y., Gadzhi A., Anufrieva E., Shadrin N. *Artemia* spp. (Crustacea, Anostraca) in Crimea: New Molecular Genetic Results and New Questions without Answers. *Water*. 2022; 14(17): 2617. <https://doi.org/10.3390/w14172617>
10. Kovacheva N.P., Litvinenko L.I., Saenko E.M., Zhigin A.V., Kryahova N.V., Semik A.M. Current state and prospects of aquaculture *Artemia* in Russia. *Trudy VNIRO*. 2019; 178: 150–171 (in Russian). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2019-178-150-171>
11. Litvinenko L.I., Litvinenko A.I., Boiko E.G., Kutsanov K. *Artemia* cyst production in Russia. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2015; 33(6): 1436–1450. <http://doi.org/10.1007/s00343-015-4381-6>
12. Van Stappen G., Litvinenko L.I., Litvinenko A.I., Boyko E.G., Marden B., Sorgeloos P. A Survey of *Artemia* Resources of Southwest Siberia (Russian Federation). *Reviews in Fisheries Science*. 2009; 17(1): 116–148. <https://doi.org/10.1080/10641260802590095>
13. Solovov V.P., Podurovskiy M.A., Yasyuchenya T.L. Branchiopod *Artemia*: history and prospects for resource use. Barnaul. 2001; 144 (in Russian). ISBN 5-85458-020-9 EDN NCXJOK
14. Khajibayev Q., Berdimbetova G., Qarlibayeva B., Oshchepkova Yu. Study of macro- and micronutrients of artemia cysts in the Aral Sea. *Universum: khimiya i biologiya*. 2019; (9): 19–24 (in Russian). EDN IKWYPW
15. Litvinenko L.I., Litvinenko A.I., Boyko E.G. Brine shrimp *Artemia* in Western Siberia Lakes. Novosibirsk: *Nauka*. 2009; 304 (in Russian). ISBN 978-5-02-023274-7 EDN QKSWNZ
16. Kouba A., Hamáčková J., Buřič M., Polícar T., Kozák P. Use of three forms of decapsulated *Artemia* cysts as food for juvenile noble crayfish (*Astacus astacus*). *Czech Journal of Animal Science*. 2011; 56(3): 114–118. <https://doi.org/10.17221/1301-CJAS>
17. Lavens P., Sorgeloos P. Design, operation, and potential of a culture system for the continuous production of *Artemia* nauplii. Sorgeloos P., Bengtson D.A., Decler W., Jaspers E. (eds.). *Artemia research and its applications. Proceedings of the Second International Symposium on the brine shrimp Artemia*. Wetteren, Belgium: Universa Press. 1987; 3: 339–345.
18. Nguyen P.V., Huang C.T., Truong K.H., Hsiao Y.J. Profitability improvement for brine shrimp *Artemia franciscana* commercial farming in coastal saltworks in the Mekong Delta, Vietnam: A bioeconomic analysis. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2020; 51(4): 896–917. <https://doi.org/10.1111/jwas.12667>
19. Lavens P., Sorgeloos P. The history, present status and prospects of the availability of *Artemia* cysts for aquaculture. *Aquaculture*. 2000; 181(3–4): 397–403. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00233-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00233-1)

20. Metian M., Troell M., Christensen V., Steenbeek J., Pouil S. Mapping diversity of species in global aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 2020; 12(2): 1090–1100. <https://doi.org/10.1111/raq.12374>
21. Руднева И.И., Щепкина А.М. Химический состав цист артемии из различных источников. *Рыбное хозяйство*. 1990; (5): 59–60.
22. Kolkovski S., Koven W., Tandler A. The mode of action of *Artemia* in enhancing utilization of microdiet by gilthead seabream *Sparus aurata* larvae. *Aquaculture*. 1997; 155(1–4): 193–205. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00117-8)
23. Léger P., Bengtson D.A., Simpson K.L., Sorgeloos P. The Use and Nutritional Value of *Artemia* as a Food Source. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 1986; 24: 521–623.
24. Navarro J.C., Henderson R.J., McEvoy L.A., Bell M.V., Amat F. Lipid conversions during enrichment of *Artemia*. *Aquaculture*. 1999; 174(1–2): 155–166. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00004-6)
25. Igarashi M., Ma K., Chang L., Bell J.M., Rapoport S.I. Dietary n-3 PUFA deprivation for 15 weeks upregulates elongase and desaturase expression in rat liver but not brain. *Journal of Lipid Research*. 2007; 48(11): 2463–2470. <https://doi.org/10.1194/jlr.M700315-JLR200>
26. Tulli F., Tibaldi E. Changes in amino acids and essential fatty acids during early larval rearing of dentex. *Aquaculture International*. 1997; 5(3): 229–236. <https://doi.org/10.1023/A:1018339401963>
27. Strobel C., Jahreis G., Kuhnt K. Survey of n-3 and n-6 polyunsaturated fatty acids in fish and fish products. *Lipids in Health and Disease*. 2012; 11: 144. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-11-144>
28. Herawati V.E., Hutabarat H., Radjasa O.K. Nutritional Content of *Artemia* sp. Fed with *Chaetoceros calcitrans* and *Skeletonema costatum*. *HAYATI Journal of Biosciences*. 2014; 21(4): 166–172. <https://doi.org/10.4308/hjb.21.4.166>
29. Smith M.E., Fuiman L.A. Causes of Growth Depensation in Red Drum, *Sciaenops Ocellatus*, Larvae. *Environmental Biology of Fishes*. 2003; 66(1): 49–60. <https://doi.org/10.1023/A:1023240524984>
30. Moruzi I.V. et al. Biochemical Composition of *Artemia* Cysts Used as Food for Juvenile Fish from Different Hypersaline Lakes of the Altai Territory. *Ekoloji*. 2017; 26(102): e102001. EDN VBKRIL
20. Metian M., Troell M., Christensen V., Steenbeek J., Pouil S. Mapping diversity of species in global aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 2020; 12(2): 1090–1100. <https://doi.org/10.1111/raq.12374>
21. Rudneva I.I., Shchepkina A.M. Chemical composition of *Artemia* cysts from various sources. *Fisheries*. 1990; (5): 59–60 (in Russian).
22. Kolkovski S., Koven W., Tandler A. The mode of action of *Artemia* in enhancing utilization of microdiet by gilthead seabream *Sparus aurata* larvae. *Aquaculture*. 1997; 155(1–4): 193–205. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00117-8)
23. Léger P., Bengtson D.A., Simpson K.L., Sorgeloos P. The Use and Nutritional Value of *Artemia* as a Food Source. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 1986; 24: 521–623.
24. Navarro J.C., Henderson R.J., McEvoy L.A., Bell M.V., Amat F. Lipid conversions during enrichment of *Artemia*. *Aquaculture*. 1999; 174(1–2): 155–166. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00004-6)
25. Igarashi M., Ma K., Chang L., Bell J.M., Rapoport S.I. Dietary n-3 PUFA deprivation for 15 weeks upregulates elongase and desaturase expression in rat liver but not brain. *Journal of Lipid Research*. 2007; 48(11): 2463–2470. <https://doi.org/10.1194/jlr.M700315-JLR200>
26. Tulli F., Tibaldi E. Changes in amino acids and essential fatty acids during early larval rearing of dentex. *Aquaculture International*. 1997; 5(3): 229–236. <https://doi.org/10.1023/A:1018339401963>
27. Strobel C., Jahreis G., Kuhnt K. Survey of n-3 and n-6 polyunsaturated fatty acids in fish and fish products. *Lipids in Health and Disease*. 2012; 11: 144. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-11-144>
28. Herawati V.E., Hutabarat H., Radjasa O.K. Nutritional Content of *Artemia* sp. Fed with *Chaetoceros calcitrans* and *Skeletonema costatum*. *HAYATI Journal of Biosciences*. 2014; 21(4): 166–172. <https://doi.org/10.4308/hjb.21.4.166>
29. Smith M.E., Fuiman L.A. Causes of Growth Depensation in Red Drum, *Sciaenops Ocellatus*, Larvae. *Environmental Biology of Fishes*. 2003; 66(1): 49–60. <https://doi.org/10.1023/A:1023240524984>
30. Moruzi I.V. et al. Biochemical Composition of *Artemia* Cysts Used as Food for Juvenile Fish from Different Hypersaline Lakes of the Altai Territory. *Ekoloji*. 2017; 26(102): e102001. EDN VBKRIL

ОБ АВТОРАХ

Наталья Анатольевна Горбунова¹

кандидат технических наук, ученый секретарь
n.gorbunova@fncps.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4249-9316>

Максим Борисович Ребезов¹

доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
главный научный сотрудник
m.rebezov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Ольга Петровна Болешенко²

кандидат технических наук,
заместитель директора по инновациям
o.boleshenko@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3872-4699>

Ярослав Максимович Ребезов³

кандидат биологических наук, научный сотрудник,
Сектор прикладной биотехнологии;
Учебно-научная исследовательская лаборатория
химико-технологического института
yaroslavreb@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1121-8139>

¹Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» Российской академии наук, Дмитровское шоссе, 11, Москва, 127434, Россия

³Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Natalia Anatolyevna Gorbunova¹

Candidate of Technical sciences, Scientific Secretary
n.gorbunova@fncps.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4249-9316>

Maksim Borisovich Rebezov¹

Doctor of Agricultural sciences,
Professor, Chief Researcher
m.rebezov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Olga Petrovna Boleshenko²

Candidate of Technical sciences,
Deputy Director for Innovation
o.boleshenko@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3872-4699>

Yaroslav Maksimovich Rebezov³

Candidate of biological sciences, Research Fellow,
Applied Biotechnology Sector;
Educational and scientific research laboratory
of the Institute of Chemical Technology
yaroslavreb@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1121-8139>

¹Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin st., Moscow, 109316, Russia

²All-Russian Scientific Research Institute of Grain and its Processed Products — Branch of Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 11 Dmitrovskoe Highway, Moscow, 127434, Russia

³Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya st., Veliky Novgorod, 173003, Russia

И.Ю. Резниченко ✉

Е.А. Егушова

Кузбасский государственный
аграрный университет им.
В.Н. Полецкова, Кемерово, Россия

✉ irina.reznichenko@gmail.com

Поступила в редакцию: 20.11.2025

Одобрена после рецензирования: 11.02.2026

Принята к публикации: 25.02.2026

© Резниченко И.Ю., Егушова Е.А.

Исследование нутриентного состава мякоти тыквы как сырьевого ингредиента для продуктов питания заданного состава

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Тыква обыкновенная (*Cucurbita pepo*) – широко распространенное культивируемое пищевое и кормовое растение. Для организма тыква ценна своим сбалансированным и богатым составом нутриентов. Ее мякоть содержит белки, клетчатку, антиоксиданты, витамины группы B, PP, C, E, D, K, фолиевую кислоту, минеральные вещества — кальций, магний, железо, цинк, фосфор, калий, фтор и др. Ассортимент продуктов питания, в состав которых входят плоды тыквы, ограничен определенными однородными группами: свежие плоды и овощи, кондитерские изделия, соковая продукция, некоторые виды пищевых концентратов. В связи с чем научные исследования, направленные на изучение состава местных сортов тыквы, приобретают актуальность и практическую значимость с точки зрения переработки сельскохозяйственной продукции и производства продуктов питания заданного состава. Цель исследований заключалась в изучении массовой доли органических кислот, сахаров, белка, пищевых волокон, витамина C, кальция, железа и фосфора в мякоти тыквы сорта Россиянка, произрастающей в условиях Кемеровской области.

Методы. При исследовании использовались стандартные методы анализа. Определено содержание органических кислот, витамина C, кальция, фосфора, белка, сахаров, пищевых волокон в мякоти тыквы.

Результаты. Получены новые данные по содержанию органических кислот, пищевых волокон, сахаров, кальция и фосфора. В мякоти плодов тыквы установлено, что наибольшее количество содержится лимонной (726,0 мг/дм³) и яблочной (489,0 мг/дм³) органических кислот, наименьшее молочной (134,0 мг/дм³) и муравьиной (120,0 мг/дм³). Менее 1 мг/дм³ щавелевой и винной. Содержание аскорбиновой кислоты составляет 3,18%, на долю кальция приходится 35 мг/100 г, фосфора — 36,7 мг/100 г. Практическая значимость полученных результатов реализуется в дополнении базы данных химического состава отечественных сортов тыквы и представляется перспективной для технологического использования мякоти тыквы в производстве продуктов питания заданного состава.

Ключевые слова: тыква, органические кислоты, аскорбиновая кислота, минеральные вещества, пищевые волокна, сахара, белок

Для цитирования: Резниченко И.Ю., Егушова Е.А. Исследование нутриентного состава мякоти тыквы как сырьевого ингредиента для продуктов питания заданного состава. *Аграрная наука.* 2026; 405 (04): 120–126.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-120-126>

Research article

Irina Yu. Reznichenko ✉

Elena A. Egushova

Кузбасский государственный
аграрный университет им.
В.Н. Полецкова, Кемерово,
Россия

✉ irina.reznichenko@gmail.com

Received by the editorial office: 20.11.2025

Accepted in revised: 11.02.2026

Accepted for publication: 25.02.2026

© Reznichenko I. Yu., Egushova E. A.

Study of the nutrient composition of pumpkin pulp as a raw ingredient for food products of a specified composition

ABSTRACT

Relevance. Pumpkin (*Cucurbita pepo*) is a widespread and cultivated food and forage plant. The vegetable is used as food for the prevention and treatment of many diseases. Pumpkin is valuable for the body due to its balanced and rich composition. Pumpkin pulp contains proteins, fiber, antioxidants, vitamins B, PP, C, E, D, K, folic acid, minerals – calcium, magnesium, iron, zinc, phosphorus, potassium, fluorine, etc. A range of food products that include pumpkin fruits are limited to certain homogeneous groups: fresh fruits and vegetables, confectionery products, juice products, some types of food concentrates. In this connection, scientific research aimed at studying the composition of local pumpkin varieties is gaining relevance and practical significance from the point of view of processing agricultural products and producing food products of a given composition. The purpose of the research was to study the mass fraction of organic acids, sugars, protein, dietary fiber, vitamin C, calcium, iron and phosphorus in the pulp of the pumpkin variety Rossiyanka, growing in the Kemerovo region.

Methods. The study used standard analytical methods. The content of organic acids, vitamin C, calcium, phosphorus, protein, sugars, and dietary fiber in pumpkin pulp was determined.

Results. New data on the content of organic acids, dietary fiber, sugars (fructose, glucose, sucrose), calcium and phosphorus were obtained. In the pulp of pumpkin fruits it was found that the largest amount contains citric (726.0 mg/dm³) and malic (489.0 mg/dm³) organic acids, the smallest amount is lactic (134.0 mg/dm³) and formic (120.0 mg/dm³). Less than 1 mg/dm³ of oxalic and wine. The content of ascorbic acid is 3.18%, calcium accounts for 35 mg/100g, phosphorus — 36.7 mg/100g. The practical significance of the results obtained is realized in supplementing the database of the chemical composition of domestic pumpkin varieties and seems promising for the technological use of pumpkin pulp in the production of food products of a given composition.

Results. The maximum yield of vitamin B₁₂ (up to 897 µg/mL) was achieved at a temperature of 35 °C and a cultivation time of 16 h. Optimization of cultivation conditions increased cobalamin production by more than 40%. The obtained results can be applied in the development and scale-up of biotechnological processes.

Key words: pumpkin, organic acids, ascorbic acid, minerals, dietary fiber, sugars, protein

For citation: Reznichenko I. Yu., Egushova E. A. Study of the nutrient composition of pumpkin pulp as a raw ingredient for food products of a specified composition. *Agrarian science.* 2026; 405 (04): 120–126 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-120-126>

Введение/Introduction

Растущий интерес к продуктам здорового питания связан с их пользой для здоровья, профилактикой алиментарно-зависимых заболеваний [1–5], а также применением в составе натуральных растительных ингредиентов и исключением из состава искусственных пищевых добавок различного технологического действия (ТР ТС 029/2012)¹.

Исследование фитонутриентного состава, биологического потенциала растительного сырья имеет большое значение для эффективной профилактики и лечения многих хронических заболеваний [6–10].

Отмечена роль фитонутриентов в профилактике и лечении сахарного диабета, гипертонии, сердечно-сосудистых заболеваниях, ожирении и других болезнях [11–15].

Биологически активные соединения плодов обладают антиоксидантными, противодиабетическими, антиканцерогенными и противомикробными свойствами, что подчеркивает их важность для поддержания нормальной жизнедеятельности и повышения резистентности организма, а также как ингредиентов в пищевых технологиях [16, 17].

Одной из бахчевых культур, издавна применяемых в питании, является тыква, принадлежащая к семейству *Cucurbitaceae*. Тыква (*Cucurbita*) является хорошо известным растением, культивируемым и широко используемым в качестве лекарственного средства и функционального продукта питания, как показывают результаты многих научных исследований [18–22].

Тыква и продукты ее переработки, к которым относятся семена, кожура, мякоть содержат активные ингредиенты, действующие как эффективные антиоксиданты и противомикробные средства. Все части плодов тыквы обладают отличными фитохимическими свойствами, способными оказывать положительное воздействие на здоровье [23].

Содержание пищевых волокон в семенах тыквы составляет $26,75 \pm 0,98\%$ [24]. Семена тыквы характеризуются наличием аминокислот, органических кислот, жирных кислот. Содержание линолевой и олеиновой кислот (C18:2n6 и C18:1n9) в семенах тыква преобладающее, наименьшее количество пальмитиновой кислоты (C16:1n7). По минеральному составу семена богаты калием (2560,3–6697,5 мг/кг), фосфором (529,8–1120,9 мг/кг) и магнием (426–1124,5 мг/кг) [25, 26]. Установлено значительное количество треонина, серина, метионина, изолейцина и тирозина в семенах тыквы, а в кожуре высокое содержание витамина С, натрия и калия, железа и цинка [27].

Проведенный анализ масла семян тыквы сорта *Cucurbita maxima* выявил содержание полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) в диапазоне от 52,23% до 57,65%. Показано, что масло является

хорошим источником фенольных соединений, содержание которых в среднем составляет 27,50 мг эквивалента галловой кислоты на грамм метанольного экстракта и 633,5 мг/кг общего количества токоферолов, что придает ему очень сильный антиоксидантный характер. Кроме того, масло имеет высокую антиоксидантную активность ($126,20 \pm 20,44$) мкг/мл [28].

Установлено, что мононенасыщенные жирные кислоты (линолевая, олеиновая, линоленовая и др.) обладают ингибирующей активностью в отношении пенистых клеток, что подтверждает их антисклеротическое действие [29].

Основными фитохимическими веществами в тыквенном масле, имеющими полезные для здоровья свойства, являются полифенолы, фитостеролы и жирные кислоты. Также могут способствовать улучшению здоровья каротиноиды, сквален, токоферолы и минералы масла тыквы. Исследования, проведенные *in vitro*, подтверждают мнение о том, что масло семян тыквы обладает антиоксидантной и противомикробной активностью [30].

Данные проведенных исследований химического состава мякоти различных сортов тыквы отечественных сортов позволили выявить ее высокую биологическую ценность [31–35].

В целом наблюдается научный интерес к изучению биологической ценности плодов тыквы, как потенциального сырья для применения в технологиях продуктов питания специализированной и функциональной направленности и лечебно-профилактического действия. Однако биологическая ценность плодов зависит и от условий выращивания, от климатических условий, от сорта тыквы и вида продуктов ее переработки [36–38].

Многие фермерские хозяйства Кузбасса предпочитают выращивать сорт тыквы Россиянка, так как он устойчив к пониженным температурам и экстремальным условиям выращивания, в тоже время обладает хорошей транспортабельностью и длительными сроками хранения. Тыкву используют в свежем виде и перерабатывают в соки, пюре, варенье. Продукты переработки тыквы реализуют через сеть фермерских магазинов Кузбасса². Для разработки продуктов питания заданного состава с применением плодов тыквы необходимы знания о содержании пищевых веществ и биологической ценности плодов, что определило цель настоящих исследований.

Цель исследований заключалась в изучении массовой доли органических кислот, сахаров, белка, пищевых волокон, витамина С, кальция, железа и фосфора в мякоти тыквы сорта Россиянка, произрастающей в умеренно-континентальных агроклиматических условиях Кемеровской области — Кузбасса Российской Федерации.

¹ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 029/2012 Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств

² Более 80 млн рублей направлено на развитие семейных ферм Кузбасса. Электронный ресурс: <https://mcx42.ru/news/item/1733>

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Объектом исследования являлась мякоть плодов тыквы Россиянка, урожая 2024 года, выращенной на полях учебно-опытного хозяйства КузГАУ (Кемерово, Россия). При отборе образцов руководствовались требованиями ГОСТ 7975-2013 (п.7.4)³ При проведении исследований применяли следующие методы анализа: массовые концентрации щавелевой, муравьиной, винной, яблочной, лимонной, янтарной, молочной, уксусной кислот определяли согласно М 04-47-2012⁴ методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель-105 М» (Россия); содержание витамина С определяли по ГОСТ 7047-55⁵; массовую долю кальция определяли согласно Руководства по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов⁶; массовую долю железа — по ГОСТ 26928-86⁷; массовую долю фосфора — по МУ 4.11.3217-14⁸; массовую долю пищевых волокон — по ГОСТ Р 54014-2010⁹; массовую долю белка — по МУ 4237-86¹⁰; массовую долю золы — по ГОСТ 5901-2014¹¹, массовые доли фруктозы, сахарозы и глюкозы — по М 04.-69-2011¹².

Содержание нитратов определяли по МУ 5048-89¹³.

За окончательный результат содержания органических кислот брали результаты двух параллельных исследований на оборудовании «Капель - 105 М».

При проведении исследований проводили статистическую обработку полученных данных, используя программу Statistica 10.0 (StatSoft, США) Результаты считались статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На первом этапе работы установлено соответствие образцов тыквы требованиям ГОСТ 7975-2013³. Плоды, применяемые в исследованиях, по внешнему виду характеризовались как свежие, целые, здоровые, без заболеваний и повреждений. Цвет плодов ярко-оранжевый, свойственный сорту, плоды зрелые со сформировавшимися семенами и окраской корки. Наличие поврежденных плодов, сельскохозяйственных вредителей, посторонних примесей не выявлено. Массовая доля

сухих растворимых веществ в анализируемых образцах мякоти тыквы составляла $9,3 \pm 0,5\%$.

Из показателей безопасности определяли содержание нитратов. В результате исследования содержание нитратов оказалось менее предела обнаружения методики 29,0 мг/кг, что объясняется выращиванием плодов в условиях опытного хозяйства, близкого к условиям фермерских хозяйств, которые не применяют удобрения при выращивании.

На следующем этапе работы анализировали нутриентный состав мякоти тыквы. Известно, что кислотность плодов, обусловленная наличием органических кислот, влияет на формирование качественных характеристик продукта и имеет значение при технологии переработки сырья в готовый продукт заданной консистенции [39].

Так, например, органические кислоты в присутствии сахаров и пектиновых веществ участвуют в формировании студнеобразной консистенции продукта, также некоторые органические кислоты применяются в качестве антиоксидантов (лимонная кислота) и способствуют сохранению витаминов и минеральных веществ при переработке плодовоовощного сырья [40, 41].

Основная роль органических кислот, входящих в состав пищи, связана с формированием вкусоароматических характеристик продукта и участием кислот в процессах пищеварения [42].

Основные функции органических кислот заключаются в активации перистальтики кишечника, стимуляции секреции пищеварительных соков, влиянии на состав микрофлоры путем снижения рН среды, торможении развития гнилостных процессов в толстом кишечнике [43].

Органические кислоты поддерживают уровень рН в пределах щелочной среды — 7,4 и создают оптимальные условия для функционирования пищеварительного тракта. Органические кислоты поступают в организм человека с пищей, наиболее значимыми считаются молочная, лимонная, янтарная и щавелевая кислоты.

Анализ содержания органических кислот в мякоти тыквы показал, что наибольшее количество приходится на лимонную кислоту, доля которой составила 726 мг/дм³. Менее 1 мг/дм³ приходилось на две кислоты: щавелевую и винную.

Содержание органических кислот приведено в таблице 1.

³ ГОСТ 7975-2013 Тыква продовольственная свежая. Технические условия

⁴ М 04-47-2012 Методика измерений массовой концентрации органических кислот и их солей методом капиллярного электрофореза

⁵ ГОСТ 7047-55 Витамины А, С, Д, В₁, В₂ и РР. Отбор проб, методы определения витаминов и испытания качества витаминных препаратов

⁶ Метод анализа качества и безопасности пищевых продуктов, г. Москва, 1998 г. И.М. Скурихин В.А. Тутельян

⁷ ГОСТ 26928-86 Продукты пищевые. Метод определения железа

⁸ МУ 4.11.3217-14 4.1. Методы контроля. Химические факторы. Определение фосфатов в пищевых продуктах и продовольственном сырье

⁹ ГОСТ Р 54014-2010 Продукты пищевые функциональные. Определение растворимых и нерастворимых пищевых волокон ферментативно-гравиметрическим методом

¹⁰ МУ 4237-86 Методические указания по гигиеническому контролю за питанием в организованных коллективах. Определение массовой доли белка

¹¹ ГОСТ 5901-2014 Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли золы и металломагнитной примеси

¹² М 04.-69-2011 Напитки. Плодоовощная продукция. БАД. Мед. Определение фруктозы, глюкозы и сахарозы методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"

¹³ МУ 5048-89 Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что мякоть тыквы богата органическими кислотами. Наибольшее количество приходится на лимонную и яблочную кислоты, наименьшее на муравьиную и молочную кислоты.

Средняя норма потребления органических кислот варьируется в разных странах от 45 до 110 мг/сутки, в России — 5–70 мг/сутки. С учетом знаний о содержании органических кислот в мякоти тыквы, их влияния на формирование технологических и сенсорных свойств пищевого продукта и их роли в питании можно разрабатывать полезные для здоровья продукты питания.

Данные по результатам исследования содержания аскорбиновой кислоты, кальция, железа и фосфора приведены в таблице 2.

Сравнительный анализ полученных данных по содержанию аскорбиновой кислоты с другими исследованиями показал, что имеются некоторые отличия. Так, например, содержание аскорбиновой кислоты в мякоти тыквы сорта Мускатная составляет 8 мг/100 г [32], по данным, полученным при исследовании сортов тыквы, выращенной в условиях Алтайского края, содержание аскорбиновой кислоты составляет от 9,9 (Грибовская зимняя) до 18,2 (Зимняя сладкая) мг/100 г. Анализ содержания аскорбиновой кислоты в тыкве сорта Грибовская зимняя, выращенной в условиях Кемеровской области, составляет 75,5 мг/кг [35].

В доступной научной информации при проведении поиска по составу нутриентов в тыкве сорта Россиянка за последние 10 лет найдены данные по содержанию аскорбиновой кислоты в тыкве, выращенной в условиях Свердловской области. Установлено, что доля аскорбиновой кислоты составляет 8,7 мг/100 г [32]. Также имеется информация по содержанию железа, магния, массовой доле редуцирующих сахаров в сорте тыквы Россиянка, выращенной в Свердловской области, доля которых составляет 0,62; 14,22 мг/100 г в расчете на сухое вещество и 5,42% соответственно [32]. По другим источникам, сумма сахаров в сорте Россиянка (Краснодарский край) составляет 10,3% [44]. Очевидно, что и разные сорта тыквы, выращенные в различных климатических условиях, отличаются по содержанию нутриентов и одинаковые сорта, выращенные в разных областях, имеют отличия в составе.

Информация по содержанию фосфора в тыкве сорта Россиянка не найдена, как и информация по содержанию органических кислот, пищевых волокон и моносахаров. Однако имеются данные, которые свидетельствуют о том, что макроэлементный состав плодов тыквы сорта Россиянка (выращенных Федеральным научным центром овощеводства) значительно превосходил состав сорта Грибовская Зимняя: по содержанию К, Са, Mg, Na — на 50,3–182%. Такое же превосходство сохранилось по содержанию простых сахаров:

Таблица 1. Массовая концентрация органических кислот в мякоти тыквы

Table 1. Mass concentration of organic acids in pumpkin pulp

Наименование кислоты	Результаты исследования, мг/дм ³
Муравьиная	120,0 ± 24,0
Яблочная	489,0 ± 98,0
Лимонная	726,0 ± 145,0
Янтарная	250,0 ± 50,0
Молочная	134,0 ± 27,0
Уксусная	154,0 ± 31,0

Таблица 2. Результаты определения аскорбиновой кислоты, кальция, железа, фосфора

Table 2. The results of the determination of ascorbic acid, calcium, iron, phosphorus

Определяемые показатели	Результаты исследований
Содержание аскорбиновой кислоты, мг/дм ³	3,18 ± 0,64
Массовая доля кальция, м/100 г	35,0 ± 9,5
Массовая доля железа, мг/100 г	0,20 ± 0,06
Массовая доля фосфора, мг/100 г	36,7 ± 10,3

Таблица 3. Содержание пищевых волокон, белка, золы и сахаров

Table 3. The content of dietary fiber, protein, ash and sugars

Определяемые показатели, %	Результаты исследований
Массовая доля белка	0,49 ± 0,06
Массовая доля пищевых волокон	1,95 ± 0,3
Массовая доля золы	47,37 ± 2,5
Массовая доля фруктозы	0,27 ± 0,06
Массовая доля глюкозы	Менее предела обнаружения методики
Массовая доля сахарозы	Менее предела обнаружения методики

глюкозы и фруктозы [45]. Показано, что содержание кальция составляет 51,8 мг/100 г [45] для тыквы сорта Россиянка, выращенной в умеренно континентальных агроклиматических условиях.

Анализ минерального состава исследуемой мякоти тыквы показал достаточно высокую долю кальция и фосфора. Суточная физиологическая норма потребления кальция составляет 1000 мг, фосфора — 800 мг, в случае разработки продуктов заданного состава процент удовлетворения в кальции составит 3,5%; в фосфоре 4,6% при дальнейшем исследовании форм кальция (ТР ТС 022/2011)¹⁴

Результаты исследований содержания пищевых волокон в массе обезжиренного вещества, массовая доля белка, золы и сахаров приведены в таблице 3.

Имеются данные исследований сортов тыквы, выращенной в Нигерии, которые показывают, что доля белка составляет 2,1%, пищевых волокон 1,4% при содержании влаги в мякоти 9,3% [36]. Для других сортов тыквы, культивируемых в Азии, доля белка в мякоти установлена на уровне 0,98–1,2% [37]. Очевидно, что полученные данные говорят о более низкой доле белка в мякоти тыквы сорта Россиянка, выращенной в условиях Кузбасса и более высокой доле пищевых волокон.

¹⁴ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 022/2011 Пищевая продукция в части ее маркировки

Выводы/ Conclusions

В результате исследований получены новые данные по содержанию в мякоти тыквы сорта Россиянка, выращенной в условиях Кемеровской области — Кузбасс (Россия), органических кислот. Установлено высокое содержание лимонной (726,0 мг/дм³) и яблочной (489,0 мг/дм³) кислот, что позволяет рекомендовать мякоть как сырьевой ингредиент с антиоксидантной активностью. Наименьшее количество приходится на молочную (134,0 мг/дм³) и муравьиновую (120,0 мг/дм³) кислоты, доля щавелевой и винной кислот составляет менее 1 мг/дм³. Количество аскорбиновой

кислоты составляет в мякоти тыквы 3,18 мг/дм³, пищевых волокон 1,95%. Из минеральных веществ наибольшее количество приходится на фосфор (36,7 мг/100г) и кальций (35,0 мг/100 г), наименьшее на железо (0,2 мг/100 г). Из моносахаров содержание фруктозы составляет 0,27%. Доля белка — 0,49%.

Таким образом, полученные результаты исследования мякоти тыквы сорта Россиянка дополняют базы данных химического состава пищевых продуктов и представляются перспективными для технологического использования мякоти тыквы в производстве продуктов питания заданного состава.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Munir N. *et al.* Heavy Metal Contamination of Natural Foods Is a Serious Health Issue: A Review. *Sustainability*. 2022; 14(1): 161. <https://doi.org/10.3390/su14010161>
- Mitra S. *et al.* Potential health benefits of carotenoid lutein: An updated review. *Food and Chemical Toxicology*. 2021; 154: 112328. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112328>
- Suychinov A. *et al.* Vitamins and their role in human body. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(3): 1246–1248. EDN UCNWEC
- Okuskuhanova E. *et al.* Role of Calcium, Magnesium And Phosphorous In Human Body. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(6): 258–261. EDN YMKZCP
- Третьяк Л.Н., Ребезов М.Б., Явкина Д.И. Методология функционального моделирования как инструмент обеспечения качества обогащенных хлебобулочных изделий. *Аграрная наука*. 2024; (10): 177–184 (на англ. яз.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-177-184>
- Tufail T. *et al.* Role of Phytonutrients in the Prevention and Treatment of Chronic Diseases: A Concrete Review. *ACS Omega*. 2025; 10(13): 12724–12755. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02927>
- Sunadi *et al.* Hepatitis E Inhibited by Rosmarinic Acid Extract from Clove Plant (*Syzygium aromaticum*) through Computational Analysis. *Pharmacognosy Journal*. 2023; 15(4): 518–523. <https://doi.org/10.5530/pj.2023.15.112>
- Aini N.S. *et al.* An *In Silico* Study: Phytochemical Compounds Screening of *Garcinia atroviridis* Griff. ex T. Anders as Anti-DENV. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 2023; 17(4): 2467–2478. <https://doi.org/10.22207/jpam.17.4.45>
- Dhea Kharisma V. *et al.* Mangostenone Bioactive Compound from *Garcinia mangostana* L. as Antiviral Agent via Dual Inhibitors Against E6 HPV 16/18 Oncoprotein through Computational Simulation. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 2023; 16(11): 5045–5050. <https://doi.org/10.52711/0974-360x.2023.00817>
- Gholam G.M. *et al.* Indonesian herbal compounds as potential inhibitors of *Plasmodium falciparum* CDPK2: Insights from docking, molecular dynamics, and DFT analysis. *Journal of Pharmacy and Pharmacognosy Research*. 2025; 13(S1): S289–S302. https://doi.org/10.56499/jppres25.2336_13.s1.289
- Narayanan L. *et al.* Nutritional and therapeutic potential of bioactive compounds from melons: a mini review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2024; 14(3): e11877. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.11877>
- Chaari M. *et al.* Multiobjective response and chemometric approaches to enhance the phytochemicals and biological activities of beetroot leaves: an unexploited organic waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023; 13(16): 15067–15081. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03645-0>
- Aziz E. *et al.* Rosemary species: a review of phytochemicals, bioactivities and industrial applications. *South African Journal of Botany*. 2022; 151(B): 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.09.026>
- Thiruvengadam M. *et al.* Bioactive Compounds in Oxidative Stress-Mediated Diseases: Targeting the NRF2/ARE Signaling Pathway and Epigenetic Regulation. *Antioxidants*. 2021; 10(12): 1859. <https://doi.org/10.3390/antiox10121859>

REFERENCES

- Munir N. *et al.* Heavy Metal Contamination of Natural Foods Is a Serious Health Issue: A Review. *Sustainability*. 2022; 14(1): 161. <https://doi.org/10.3390/su14010161>
- Mitra S. *et al.* Potential health benefits of carotenoid lutein: An updated review. *Food and Chemical Toxicology*. 2021; 154: 112328. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112328>
- Suychinov A. *et al.* Vitamins and their role in human body. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(3): 1246–1248. EDN UCNWEC
- Okuskuhanova E. *et al.* Role of Calcium, Magnesium And Phosphorous In Human Body. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(6): 258–261. EDN YMKZCP
- Tretyak L.N., Rebezov M.B., Yavkina D.I. Technique of functional simulation as a tool for providing the required quality of fortified bakery products. *Agrarian science*. 2024; (10): 177–184. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-177-184>
- Tufail T. *et al.* Role of Phytonutrients in the Prevention and Treatment of Chronic Diseases: A Concrete Review. *ACS Omega*. 2025; 10(13): 12724–12755. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02927>
- Sunadi *et al.* Hepatitis E Inhibited by Rosmarinic Acid Extract from Clove Plant (*Syzygium aromaticum*) through Computational Analysis. *Pharmacognosy Journal*. 2023; 15(4): 518–523. <https://doi.org/10.5530/pj.2023.15.112>
- Aini N.S. *et al.* An *In Silico* Study: Phytochemical Compounds Screening of *Garcinia atroviridis* Griff. ex T. Anders as Anti-DENV. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 2023; 17(4): 2467–2478. <https://doi.org/10.22207/jpam.17.4.45>
- Dhea Kharisma V. *et al.* Mangostenone Bioactive Compound from *Garcinia mangostana* L. as Antiviral Agent via Dual Inhibitors Against E6 HPV 16/18 Oncoprotein through Computational Simulation. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 2023; 16(11): 5045–5050. <https://doi.org/10.52711/0974-360x.2023.00817>
- Gholam G.M. *et al.* Indonesian herbal compounds as potential inhibitors of *Plasmodium falciparum* CDPK2: Insights from docking, molecular dynamics, and DFT analysis. *Journal of Pharmacy and Pharmacognosy Research*. 2025; 13(S1): S289–S302. https://doi.org/10.56499/jppres25.2336_13.s1.289
- Narayanan L. *et al.* Nutritional and therapeutic potential of bioactive compounds from melons: a mini review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2024; 14(3): e11877. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.11877>
- Chaari M. *et al.* Multiobjective response and chemometric approaches to enhance the phytochemicals and biological activities of beetroot leaves: an unexploited organic waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023; 13(16): 15067–15081. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03645-0>
- Aziz E. *et al.* Rosemary species: a review of phytochemicals, bioactivities and industrial applications. *South African Journal of Botany*. 2022; 151(B): 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.09.026>
- Thiruvengadam M. *et al.* Bioactive Compounds in Oxidative Stress-Mediated Diseases: Targeting the NRF2/ARE Signaling Pathway and Epigenetic Regulation. *Antioxidants*. 2021; 10(12): 1859. <https://doi.org/10.3390/antiox10121859>

15. Vaskovsky A.M., Chvanova M.S., Rebezov M.B. Creation of digital twins of neural network technology of personalization of food products for diabetics. *2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*. IEEE. 2020; 251–253.
<https://doi.org/10.1109/DCNAIR50402.2020.9216776>
16. Солощенко В.А., Тлехурай Д.Р., Патиева А.М. Актуальность использования натуральных антиоксидантов в технологии продуктов функционального назначения. *Устойчивое развитие естественно-научных исследований: проблемы, пути решения. Сборник научных статей*. М.: Сфера. 2025; 49–51.
 EDN HDWDUM
17. Imran M. *et al.* Lycopene as a Natural Antioxidant Used to Prevent Human Health Disorders. *Antioxidants*. 2020; 9(8): 706.
<https://doi.org/10.3390/antiox9080706>
18. Sá A.G.A., Pacheco M.T.B., Moreno Y.M.F., Carciofi B.A.M. Processing effects on the protein quality and functional properties of cold-pressed pumpkin seed meal. *Food Research International*. 2023; 169: 112876.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112876>
19. Kassymov S. *et al.* Using of pumpkin and carrot powder in production of meat cutlets: Effect on chemical and sensory properties. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020; 24(4): 1663–1670.
 EDN RDTUES
20. Habib M., Singh S., Hanan E., Jan K., Bashir K. Optimization of enzymatic hydrolysis for obtaining antioxidant hydrolysates from pumpkin seed protein: Improvement of the physicochemical, structural and functional properties. *Applied Food Research*. 2025; 5(2): 101272.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101272>
21. Abilmazhinova B. *et al.* Study chemical and vitamin composition of horsemeat cutlets with addition of pumpkin. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020; 24(8): 7614–7621.
 EDN RKIUKE
22. Rexhepi F. *et al.* Chemical changes of pumpkin seed oils and the impact on lipid stability during thermal treatment: study by FTIR — Spectroscopy. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2022; 11(6): e5839.
<https://doi.org/10.55251/jmbfs.5839>
23. Hussain A. *et al.* A Comprehensive review of functional ingredients, especially bioactive compounds present in pumpkin peel, flesh and seeds, and their health benefits. *Food Chemistry Advances*. 2022; 1: 100067.
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100067>
24. Manda Devi N., Prasad R.V., Palmei G. Physico-chemical characterization of pumpkin seeds. *International Journal of Chemical Studies*. 2018; 6(5): 828–831.
25. Kaymak H.Ç., Akan S., Karakan F.Y., Tıraşçı S. Relation between Some Phytochemical Properties and Fatty Acid Content of Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Seeds. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2025; 27(3): 663–675.
26. Quintana S.E., Marsiglia R.M., Machacon D., Torregroza E., Garcia-Zapateiro L.A. Chemical composition and physicochemical properties of squash (*Cucurbita moschata*) cultivated in Bolivar Department (Colombia). *Contemporary Engineering Sciences*. 2018; 11(21): 1003–1012.
<https://doi.org/10.12988/ces.2018.8384>
27. Amin M.Z., Islam T., Uddin M.R., Uddin M.J., Rahman M.M., Satter M.A. Comparative study on nutrient contents in the different parts of indigenous and hybrid varieties of pumpkin (*Cucurbita maxima* Linn.). *Heliyon*. 2019; 5(9): e02462.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02462>
28. Boujemaï I., El Bernoussi S., Harhar H., Tabyaoui M. The influence of the species on the quality, chemical composition and antioxidant activity of pumpkin seed oil. *OCL-Oilseeds and fats, Crops and Lipids*. 2020; 27: 40.
<https://doi.org/10.1051/ocl/2020031>
29. Widyananda M.H. *et al.* Anti-atherosclerotic potential of fatty acids in *Chlorella vulgaris* via inhibiting the foam cell formation: An *in silico* study. *Advancements in Life Sciences*. 2025; 12(2): 296–303.
<https://doi.org/10.62940/als.v12i2.3182>
30. Samec D. *et al.* The potential of pumpkin seed oil as a functional food—A comprehensive review of chemical composition, health benefits, and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022; 21(5): 4422–4446.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13013>
31. Школьников М.Н., Аббазова В.Н. Исследование химического состава мякоти тыквы как основы для безалкогольных напитков. *Вестник МГТУ*. 2021; 24(4): 441–449.
 EDN PLWYDY
32. Федорова Р.А. Качественная оценка биологической ценности тыквы при использовании в перерабатывающем производстве. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020; 59: 22–26.
 EDN ABBUTF
33. Шевякова Л.В., Бессонов В.В. Микроэлементный состав семян тыквы. *Вопросы питания*. 2018; 87(S5): 126–127.
<https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10224>
15. Vaskovsky A.M., Chvanova M.S., Rebezov M.B. Creation of digital twins of neural network technology of personalization of food products for diabetics. *2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*. IEEE. 2020; 251–253.
<https://doi.org/10.1109/DCNAIR50402.2020.9216776>
16. Solochshenko V.A., Tlekhurai D.R., Patieva A.M. The relevance of using natural antioxidants in the technology of functional products. *Sustainable development of natural science research: problems, solutions. Collection of scientific articles*. Moscow: Sfera. 2025; 49–51 (in Russian).
 EDN HDWDUM
17. Imran M. *et al.* Lycopene as a Natural Antioxidant Used to Prevent Human Health Disorders. *Antioxidants*. 2020; 9(8): 706.
<https://doi.org/10.3390/antiox9080706>
18. Sá A.G.A., Pacheco M.T.B., Moreno Y.M.F., Carciofi B.A.M. Processing effects on the protein quality and functional properties of cold-pressed pumpkin seed meal. *Food Research International*. 2023; 169: 112876.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112876>
19. Kassymov S. *et al.* Using of pumpkin and carrot powder in production of meat cutlets: Effect on chemical and sensory properties. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020; 24(4): 1663–1670.
 EDN RDTUES
20. Habib M., Singh S., Hanan E., Jan K., Bashir K. Optimization of enzymatic hydrolysis for obtaining antioxidant hydrolysates from pumpkin seed protein: Improvement of the physicochemical, structural and functional properties. *Applied Food Research*. 2025; 5(2): 101272.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101272>
21. Abilmazhinova B. *et al.* Study chemical and vitamin composition of horsemeat cutlets with addition of pumpkin. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020; 24(8): 7614–7621.
 EDN RKIUKE
22. Rexhepi F. *et al.* Chemical changes of pumpkin seed oils and the impact on lipid stability during thermal treatment: study by FTIR — Spectroscopy. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2022; 11(6): e5839.
<https://doi.org/10.55251/jmbfs.5839>
23. Hussain A. *et al.* A Comprehensive review of functional ingredients, especially bioactive compounds present in pumpkin peel, flesh and seeds, and their health benefits. *Food Chemistry Advances*. 2022; 1: 100067.
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100067>
24. Manda Devi N., Prasad R.V., Palmei G. Physico-chemical characterization of pumpkin seeds. *International Journal of Chemical Studies*. 2018; 6(5): 828–831.
25. Kaymak H.Ç., Akan S., Karakan F.Y., Tıraşçı S. Relation between Some Phytochemical Properties and Fatty Acid Content of Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Seeds. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2025; 27(3): 663–675.
26. Quintana S.E., Marsiglia R.M., Machacon D., Torregroza E., Garcia-Zapateiro L.A. Chemical composition and physicochemical properties of squash (*Cucurbita moschata*) cultivated in Bolivar Department (Colombia). *Contemporary Engineering Sciences*. 2018; 11(21): 1003–1012.
<https://doi.org/10.12988/ces.2018.8384>
27. Amin M.Z., Islam T., Uddin M.R., Uddin M.J., Rahman M.M., Satter M.A. Comparative study on nutrient contents in the different parts of indigenous and hybrid varieties of pumpkin (*Cucurbita maxima* Linn.). *Heliyon*. 2019; 5(9): e02462.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02462>
28. Boujemaï I., El Bernoussi S., Harhar H., Tabyaoui M. The influence of the species on the quality, chemical composition and antioxidant activity of pumpkin seed oil. *OCL-Oilseeds and fats, Crops and Lipids*. 2020; 27: 40.
<https://doi.org/10.1051/ocl/2020031>
29. Widyananda M.H. *et al.* Anti-atherosclerotic potential of fatty acids in *Chlorella vulgaris* via inhibiting the foam cell formation: An *in silico* study. *Advancements in Life Sciences*. 2025; 12(2): 296–303.
<https://doi.org/10.62940/als.v12i2.3182>
30. Samec D. *et al.* The potential of pumpkin seed oil as a functional food—A comprehensive review of chemical composition, health benefits, and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022; 21(5): 4422–4446.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13013>
31. Shkolnikova M.N., Abbazova V.N. Investigation of the chemical composition of pumpkin pulp as a basis for soft drinks. *Vestnik of MSTU*. 2021; 24(4): 441–449 (in Russian).
 EDN PLWYDY
32. Fedorova R.A. Qualitative assessment of the biological value of pumpkin when used in processing production. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2020; 59: 22–26 (in Russian).
 EDN ABBUTF
33. Shevyakova L.V., Bessonov V.V. Microelement composition of pumpkin seeds. *Problems of nutrition*. 2018; 87(S5): 126–127 (in Russian).
<https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10224>

34. Акабиров Л.И., Гафуров К.Х., Мажидов К.Х. Исследование физико-химической характеристики местных сортов тыквы. *Экономика и социум*. 2020; (10): 338–342.

EDN VAPFXO

35. Усов А.В., Лифенцева Л.В., Смердов О.В. Исследование содержания витаминов в свежей и сушеной тыкве. *Вестник КрасГАУ*. 2018; (3): 157–160.

EDN OVDQLJ

36. Nyong B.E. Physico-chemical composition of *Telfairia occidentalis* (fluted pumpkin fruit) pulp. *International Journal of Chemical and Biological Sciences*. 2021; 3(1-A): 15–18.

<https://doi.org/10.33545/26646765.2021.v3.i1a.25>

37. El Khatib S., Muhieddine M. Nutritional Profile and Medicinal Properties of Pumpkin Fruit Pulp. Salanta L.C. (ed.). *The Health Benefits of Foods - Current Knowledge and Further Development*. *IntechOpen*. 2020.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.89274>

38. Villamil R.-A. et al. Perspectives of pumpkin pulp and pumpkin shell and seeds uses as ingredients in food formulation. *Nutrition & Food Science*. 2023; 53(2): 459–473.

<https://doi.org/10.1108/NFS-04-2022-0126>

39. Лезина В.А., Лезин М.С. Значение аскорбиновой кислоты в восприятии вкуса в свежих плодах и ягодах. *Молодежь и наука*. 2022; (12): 4.

EDN XLYQQY

40. Мартынова Е.В., Старовойтова Н.П. Регуляторы кислотности, применяемые при изготовлении фруктовых и овощных соков. Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК. Материалы XXII международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного работника сельского хозяйства РСФСР, заведующего Кокинским опорным пунктом НИЗИСНП, доцента кафедры плодовоовощеводства Брянского СХИ Александра Алексеевича Высоцкого и 85-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ, доктора сельскохозяйственных наук, профессора, заведующего кафедрой общего земледелия и растениеводства Брянской ГСХА Владимира Феофановича Мальцева. Брянск: Брянский ГАУ. 2025; 2: 126–128.

EDN GPDIJZ

41. Дьяконова О.В., Дунаева В.И. Пектины в пищевой промышленности. Молодежный вектор развития аграрной науки. Материалы 76-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет. 2025; 3: 76–79.

EDN OKQZRX

42. Чурсина А.Д. Основные процессы, обуславливающие образование вкусоароматических веществ. Использование современных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Персиановский: Донской государственный аграрный университет. 2025; 6–8.

EDN XVPWKP

43. Степанова Е.В., Мошкина С.В. Влияние органических кислот на здоровье ЖКТ и иммунный статус молодняка. Рациональное использование сырья и создание новых продуктов биотехнологического назначения. Материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции по актуальным проблемам в области биотехнологии. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. 2025; 109–116.

EDN KMKXPG

44. Бухаров А.Ф., Степанук Н.В., Бухарова А.Р. Разнообразие отечественных сортов тыквы крупноплодной столового назначения. *Овощи России*. 2017; (2): 55–61.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-2-55-61>

45. Белецкий С.Л., Казанцев Е.В., Осипов М.В., Баженова А.Е., Химич Г.А., Мусаев Ф.Б. Сортность тыквы, как фактор повышения качества сахаристых кондитерских изделий. *Овощи России*. 2025; (4): 75–81.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-4-75-81>

34. Akabirov L.I., Gafurov K.Kh., Majidov K.H. Research of physico-chemical characteristics of local varieties of pumpkin. *Economy and society*. 2020; (10): 338–342 (in Russian).

EDN VAPFXO

35. Usov A.V., Lifentseva L.V., Smerdov O.V. The research of vitamins content in fresh and dried pumpkin. *Bulletin of KSAU*. 2018; (3): 157–160 (in Russian).

EDN OVDQLJ

36. Nyong B.E. Physico-chemical composition of *Telfairia occidentalis* (fluted pumpkin fruit) pulp. *International Journal of Chemical and Biological Sciences*. 2021; 3(1-A): 15–18.

<https://doi.org/10.33545/26646765.2021.v3.i1a.25>

37. El Khatib S., Muhieddine M. Nutritional Profile and Medicinal Properties of Pumpkin Fruit Pulp. Salanta L.C. (ed.). *The Health Benefits of Foods - Current Knowledge and Further Development*. *IntechOpen*. 2020.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.89274>

38. Villamil R.-A. et al. Perspectives of pumpkin pulp and pumpkin shell and seeds uses as ingredients in food formulation. *Nutrition & Food Science*. 2023; 53(2): 459–473.

<https://doi.org/10.1108/NFS-04-2022-0126>

39. Lyozina V.A., Lyozina M.S. The importance of ascorbic acid in the perception of taste in fresh fruits and berries. *Youth and science*. 2022; (12): 4 (in Russian).

EDN XLYQQY

40. Martynova E.V., Starovoitova N.P. Acidity regulators used in the production of fruit and vegetable juices. *Agroecological aspects of sustainable development of the agro-industrial complex. Proceedings of the XXII International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Honored Worker of Agriculture of the RSFSR, Head of the Kokinsky support point of the Research Institute of Fruit and Vegetable Growing, Associate Professor of the Department of Fruit and Vegetable Growing of the Bryansk Agricultural Institute Alexander Alekseevich Vysotsky and the 85th anniversary of the birth of Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of General Agriculture and Crop Production of the Bryansk State Agricultural Academy Vladimir F. Maltsev*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 2: 126–128 (in Russian).

EDN GPDIJZ

41. Dyakonova O.V., Dunaeva V.I. Pectins in the food industry. *Youth vector of agricultural science development. Proceedings of the 76th National scientific and practical conference of students and master's students*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University. 2025; 3: 76–79 (in Russian).

EDN OKQZRX

42. Chursina A.D. The main processes causing the formation of flavoring substances. *Use of modern technologies in agriculture and food industry. Proceedings of the International scientific and practical conference of students, postgraduates, and young scientists*. Persianovsky: Don State Agrarian University. 2025; 6–8 (in Russian).

EDN XVPWKP

43. Stepanova E.V., Moshkina S.V. Effect of organic acids on gastrointestinal health and immune status of youth. *Rational use of raw materials and creation of new biotechnological products: Proceedings of the VIII International scientific and practical Internet conference on current issues in the field of biotechnology*. Orrel: Orrel State Agrarian University named after N.V. Parakhin. 2025; 109–116 (in Russian).

EDN KMKXPG

44. Bukharov A.F., Stepanuk N.V., Bukharova A.R. Biodiversity of national squash cultivar accessions. *Vegetable crops of Russia*. 2017; (2): 55–61 (in Russian).

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-2-55-61>

45. Beletsky S.L., Kazantsev E.V., Osipov M.V., Bazhenova A.E., Khimich G.A., Musaev F.B. Pumpkin variety as a factor in improving the quality of sugar confectionery products. *Vegetable crops of Russia*. 2025; (4): 75–81 (in Russian).

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-4-75-81>

ОБ АВТОРАХ:

Ирина Юрьевна Резниченко

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биотехнологий и производства продуктов питания
irina.reznichenko@gmail.com
<https://orcid.org/>

Елена Анатольевна Егушова

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой биотехнологий и производства продуктов питания
egushova@mail.ru

Кубзасский государственный аграрный университет
им. В.Н. Полецкова,
ул. Марковцева, 5, Кемерово, 650056, Россия

ABOUT THE AUTHORS:

Irina Yuryevna Reznichenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Biotechnology and Food Production
irina.reznichenko@gmail.com
<https://orcid.org/>

Elena Anatolievna Egushova

Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, Head of the Department of Biotechnology and Food Production
egushova@mail.ru

Kuzbass State Agrarian University named
after V. N. Poletskov,
5 Markovtsev st., Kemerovo, 650056, Russia

УДК 631.171:004.3:004.932

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-127-136

А.И. Кутырёв ✉

И.Г. Смирнов

Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ,
Москва, Россия

✉ alexeykutyrev@gmail.com

Поступила в редакцию: 14.01.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Кутырёв А.И., Смирнов И.Г.

Применение трансформерной архитектуры глубокого обучения (RF-DETR) для мониторинга деревьев-опылителей в рядах садовых насаждений

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Для оптимизации опыления и повышения урожайности яблоневых садов необходим точный учет деревьев-опылителей. Существующие методы дистанционного зондирования не обеспечивают необходимой детализации для распознавания отдельных деревьев по сортовой принадлежности в условиях плотной линейной посадки. В статье предлагается метод автоматизированного мониторинга деревьев-опылителей в рядах садовых насаждениях, основанный на современной трансформерной архитектуре глубокого обучения RF-DETR.

Методы. Метод строится на анализе изображений, полученных с помощью аэро- и наземной съемки, и позволяет распознавать опылители по наличию сохранившихся плодов. Для обучения использовался размеченный датасет (2500 изображений), верифицированный экспертами-агрономами, что обеспечило высокое качество данных. Обучение и сравнительный анализ конфигураций модели (Nano, Small, Medium, Large) на размеченном наборе данных показало, что модель RF-DETR Medium обеспечивает высокую точность распознавания (mAP@50:95 = 0,658) и позволяет проводить обработку данных в режиме реального времени (5,9 FPS). Сочетание характеристик позволяет использовать модель как на бортовых компьютерах роботизированных систем, так и для обработки данных на серверном оборудовании. Апробация метода в контрольном ряду позволила выявить дефицит деревьев-опылителей и точно локализовать проблемные участки сада.

Результаты. Полученные результаты подтверждают, что использование трансформерных моделей позволяет отказаться от субъективных и трудоемких методов учета, обеспечивая при этом масштабируемость анализа.

Ключевые слова: распознавание объектов, мониторинг садовых насаждений, компьютерное зрение, глубокое обучение, беспилотный летательный аппарат, роботизированная платформа

Для цитирования: Кутырёв А.И., Смирнов И.Г. Применение трансформерной архитектуры глубокого обучения (RF-DETR) для мониторинга деревьев-опылителей в рядах садовых насаждений. *Аграрная наука*. 2026; 405(04): 127–136.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-127-136>

Application of the deep learning transformer architecture (RF-DETR) for monitoring pollinator trees in orchard rows

ABSTRACT

Relevance. Accurate monitoring of pollinizer trees is essential for optimizing pollination and increasing the yield of apple orchards. Existing remote sensing methods lack the necessary detail for recognizing individual trees by cultivar within densely planted linear rows. This paper proposes an automated method for monitoring pollinizer trees in orchard rows, based on the advanced RF-DETR deep learning transformer architecture.

Methods. The method relies on analyzing imagery from aerial and ground-based platforms and enables the recognition of pollinizers based on the presence of persistent fruits. A labeled dataset (2500 images), verified by expert agronomists, was used for training, ensuring high data quality. Training and comparative analysis of model configurations (Nano, Small, Medium, Large) on the labeled dataset demonstrated that the RF-DETR Medium model achieves high recognition accuracy (mAP@50:95 = 0.658) and enables real-time data processing (5.9 FPS). This combination of features allows the model to be used both on onboard computers of robotic systems and for data processing on server hardware. Field testing of the method in a control row successfully identified a deficit of pollinizer trees and precisely localized problematic sections of the orchard.

Results. The obtained results confirm that the use of transformer models allows for moving away from subjective and labor-intensive monitoring methods while ensuring scalable analysis.

Key words: object recognition, garden plant monitoring, computer vision, deep learning, unmanned aerial vehicle, robotic platform

For citation: Kutyrev A.I., Smirnov I.G. Application of the deep learning transformer architecture (RF-DETR) for monitoring pollinator trees in orchard rows. *Agrarian science*. 2026; 405(04): 127–136 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-127-136>

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-127-136

Alexey I. Kutyrev ✉

Igor G. Smirnov

Federal Scientific Agroengineering
Center VIM, Moscow, Russia

✉ alexeykutyrev@gmail.com

Received by the editorial office: 14.01.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Kutyrev A.I., Smirnov I.G.

Введение/Introduction

Эффективное перекрестное опыление является ключевым биологическим фактором, определяющим урожайность и качество плодов яблони. Большинство коммерческих сортов яблони самобесплодны или частично самоплодны, что делает необходимым наличие в саду специализированных сортов-опылителей, цветущих одновременно с основной (товарной) культурой [1]. Для обеспечения равномерного переноса пыльцы в интенсивных насаждениях применяется линейная схема посадки, при которой опылители размещаются в рядах через определенные интервалы. Однако на практике из-за различных факторов фактическое расположение опылителей часто отклоняется от оптимальной (расчетной), что ведет к формированию зон с их дефицитом [2, 3]. Следствием этого может стать неравномерное завязывание плодов, снижение общего урожая и ухудшение его товарного качества. Для оптимизации пространственного распределения опылителей необходим точный учет их фактического расположения и количества [4].

Актуальность задачи мониторинга деревьев-опылителей в рядах садовых насаждений обусловлена несколькими факторами: 1) оптимизацией планирования закладки садов на основе данных о фактическом расположении и достаточности опылителей для обеспечения равномерного перекрестного опыления; 2) возможностью выявления зон с дефицитом опылителей для адресного применения операций (подсадка деревьев, использование шмелиных ульев или искусственное опыление); 3) требованиями точного земледелия, предполагающими переход от экспертных оценок к объективным, количественным данным о структуре насаждений.

Существующие методы инвентаризации садовых насаждений (визуальный осмотр, анализ планов посадок) являются трудоемкими и субъективными, а также обладают низкой масштабируемостью. Спутниковые данные и аэрофотоснимки, хотя и покрывают значительные площади, зачастую не обладают достаточным разрешением для идентификации отдельных деревьев по сортовой принадлежности [5, 6]. Автоматизированные подходы на основе CNN, направленные на сегментацию крон или подсчет деревьев, как правило, не ориентированы на классификацию по сортам в условиях плотной линейной посадки [7, 8].

Целью исследования является разработка и апробация метода автоматизированного распознавания деревьев-опылителей в яблоневом саду на основе трансформерной архитектуры глубокого обучения RF-DETR (Detection Transformer) (Roboflow» США).

В работе решаются следующие задачи: создание размеченного датасета на основе изображений рядов садовых насаждений, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и наземных роботизированных платформ; обучение и

валидация модели RF-DETR для распознавания и классификации деревьев; оценка точности метода и его тестирование на контрольном участке.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

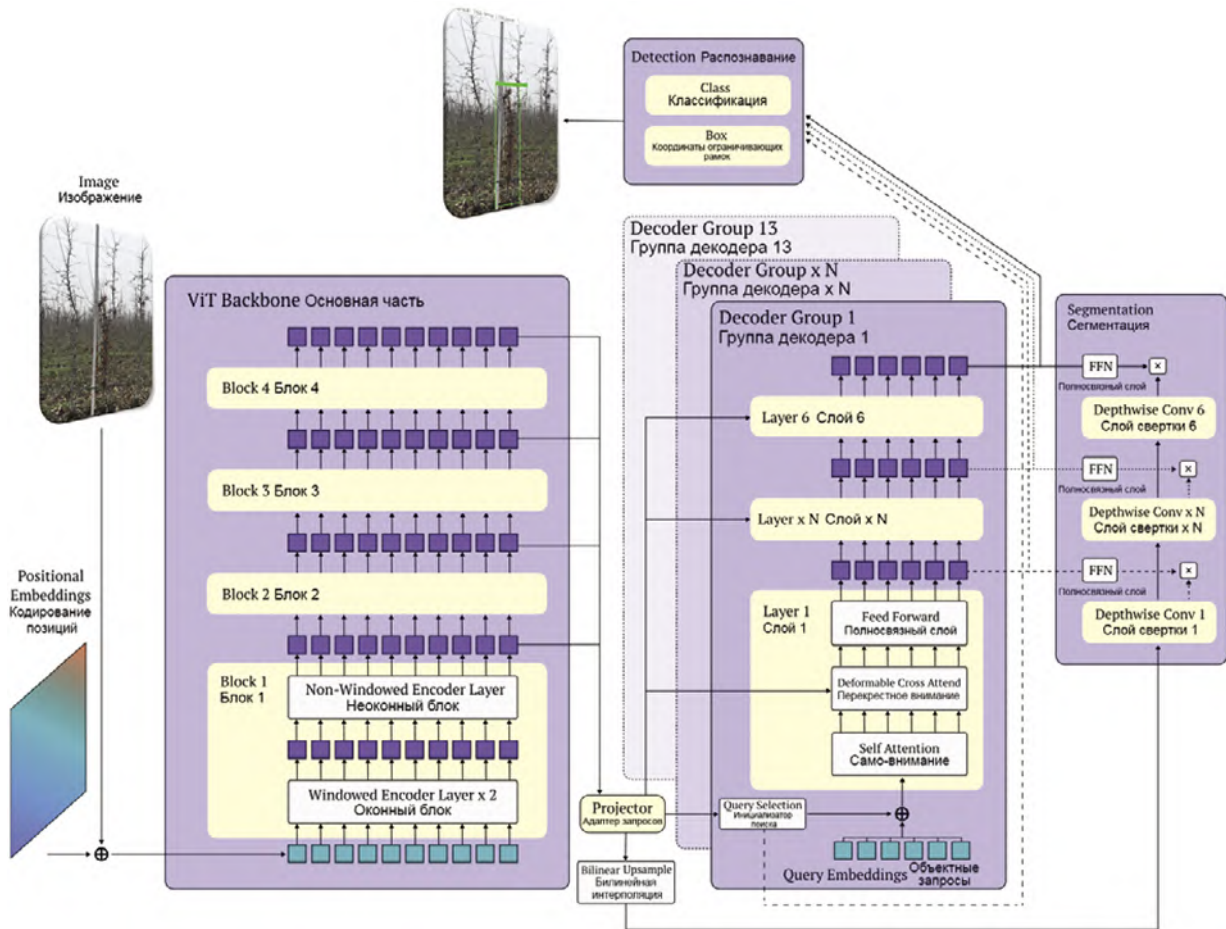
Для решения задачи выбрана архитектура RF-DETR, которая обладает рядом преимуществ для распознавания объектов в сложных условиях [9]. Согласно данным сравнительного анализа на датасете COCO 2017, модель RF-DETR-L (Large) (Roboflow, США) показывает наивысшую точность среди современных моделей для распознавания объектов с показателями метрики средней точности mAP 50:95 = 59% и mAP 50 = 77,3%, что существенно превышает результаты последних версий моделей YOLO (v11, v12) (Данные о производительности модели получены в ходе независимого тестирования и валидации на платформе Roboflow (leaderboard.roboflow.com)). Трансформерная архитектура DETR (Meta AI, США), лежащая в основе модели, обеспечивает глобальный контекстный анализ изображения, что необходимо для точного распознавания объектов на сложном фоне (тени, изменяющееся освещение). Высокое значение метрики mAP позволяет минимизировать ошибки как пропуска объектов (False Negative), так и ложных срабатываний (False Positive). Модель RF-DETR оптимизирована для задач реального времени, что позволяет анализировать большие массивы данных (десятки гектаров сада) [10].

Модель RF-DETR имеет оптимизированную трансформерную архитектуру (рис. 1).

Основная сеть (Backbone) основана на модели DINOv2 (Vision Transformer), предобученной методом самообучения (self-supervised learning) на обширном наборе данных [11]. Трансформер-энкодер обрабатывает признаки от основной части, используя чередование оконных (Windowed) и неоконных (Non-Windowed) блоков. Оконные блоки анализируют детали и текстуры внутри небольших фрагментов изображения (локальное внимание), а неоконные блоки устанавливают связи между всеми частями кадра (глобальное внимание). Этот гибридный подход позволяет балансировать между точностью и скоростью, что важно для анализа изображений высокого разрешения. Модуль выбора запросов (Query Selection) и адаптер запросов (Projector) формируют и преобразуют начальные объектные запросы (Query Embeddings), которые подаются в декодер. Адаптер переводит абстрактные запросы в пространство визуальных признаков, что позволяет декодеру эффективнее распознавать объекты на изображениях. Трансформер-декодер состоит из нескольких групп (Decoder Group), каждая из которых содержит слои механизмом деформируемого кросс-внимания (Deformable Cross Attend). Этот механизм позволяет каждому запросу фокусироваться на наиболее релевантных ключевых точках изображения, обеспечивая высокую эффективность при

Рис. 1. Архитектура модели RF-DETR

Fig. 1. RF-DETR model architecture



работе с объектами различного масштаба [12].

Блок распознавания объектов включает два независимых модуля для определения класса объекта (Class) и для вычисления координат ограничивающей рамки (Box). Они преобразуют выходные данные декодера в финальные предсказания. Блок семантической сегментации (Segmentation) используется в качестве дополнительного модуля для построения точных контуров (масок) каждого распознанного объекта [10]. Архитектура RF-DETR исключает необходимость в традиционных для CNN-детекторов этапах, таких как генерация якорных рамок (anchor boxes) и постобработка методом подавления максимумов (Non-Maximum Suppression), обеспечивая при этом высокую точность (метрика mAP) и производительность, необходимые для анализа изображений рядов садовых насаждений в режиме реального времени [13, 14].

Линейка моделей RF-DETR включает конфигурации разной вычислительной сложности:

- ✓ Nano (30,5 млн. параметров),
- ✓ Small (32,1 млн. параметров),
- ✓ Medium (33,7 млн. параметров),
- ✓ Large (135,6 млн. параметров).

Это позволяет на этапе проектирования системы выбрать оптимальный баланс между точностью распознавания и производительностью, исходя из доступных вычислительных ресурсов.

Сбор данных для обучения моделей проведен в ООО «Зоринский сад» (Курская область, Обоянский район, Россия) в декабре 2025 года.

Выбор периода зимнего покоя обусловлен необходимостью минимизации факторов, осложняющих анализ. После опадения листвы кроны деревьев становятся полностью открытыми, что исключает ошибки, связанные с затенением и взаимным перекрытием объектов. Основным признаком выступает наличие на деревьях-опылителях (сорт Ред Делишес) сохранившихся плодов, в то время как кроны основного сорта (Гала Фендека) свободны от урожая, что объясняется биологической спецификой сорта-опылителя: его плоды обладают высокой устойчивостью к опадению и сохраняются на ветвях значительно дольше. Это создает визуальный контраст по принципу «дерево с плодами/дерево без плодов» для точного распознавания. Кроме того, зимний период характеризуется низким положением солнца, что приводит к формированию длинных, но структурно предсказуемых теней и отсутствию ярких бликов, характерных для летнего сезона. Такие условия освещения существенно снижают вариабельность данных, повышая однородность набора изображений.

Для съемки садовых насаждений использовался беспилотный летательный аппарат DJI Mavic 3 Multispectral (Da-Jiang Innovations, Китай), данные

Рис. 2. Сбор наборов данных (изображений) с помощью беспилотного летательного аппарата (1) и роботизированной платформы (2). Фотография сделана авторами в промышленных насаждениях ООО «Зоринский сад»

- 1) беспилотный летательный аппарат DJI Mavic 3 Multispectral
- 2) роботизированная платформа

Fig. 2. Collection of datasets (images) using an unmanned aerial vehicle (1) and a robotic platform (2). The photo was taken by the authors in the industrial plantings of LLC «Zorinsky Garden»

- 1) DJI Mavic 3 Multispectral Unmanned Aerial Vehicle
- 2) robotic platform



использовались только в RGB-диапазоне и роботизированная платформа (производство ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Россия), оснащённые камерой DJI Action 5 Pro (Da-Jiang Innovations, Китай) (рис. 2).

БЛА и роботизированная платформа оснащены высокоточными системами позиционирования: на роботизированной платформе установлен GNSS-приемник RTK «Ителма», а на БЛА встроенный GNSS-модуль, что обеспечивало точное отслеживание маршрутов движения. Для баланса между детализацией и объемом данных съемка велась в разрешении Full HD (1080p) с частотой 60 кадров/с. Съемка с БЛА проводилась в междурядьях шириной 3,2 м на низкой высоте 1,5–2 м. Для наземной съемки использовалась платформа с той же камерой, установленной на высоте 1,8 м. Высокая светочувствительность сенсора (до ISO 6400), эффективная стабилизация, а также устойчивость к низким температурам позволили получить резкие снимки без размытия в движении. Комбинация воздушной и наземной съемки обеспечила

вариативность точек обзора, что способствовало сбору более репрезентативного набора данных и в дальнейшем повышению устойчивости модели к изменению ракурса.

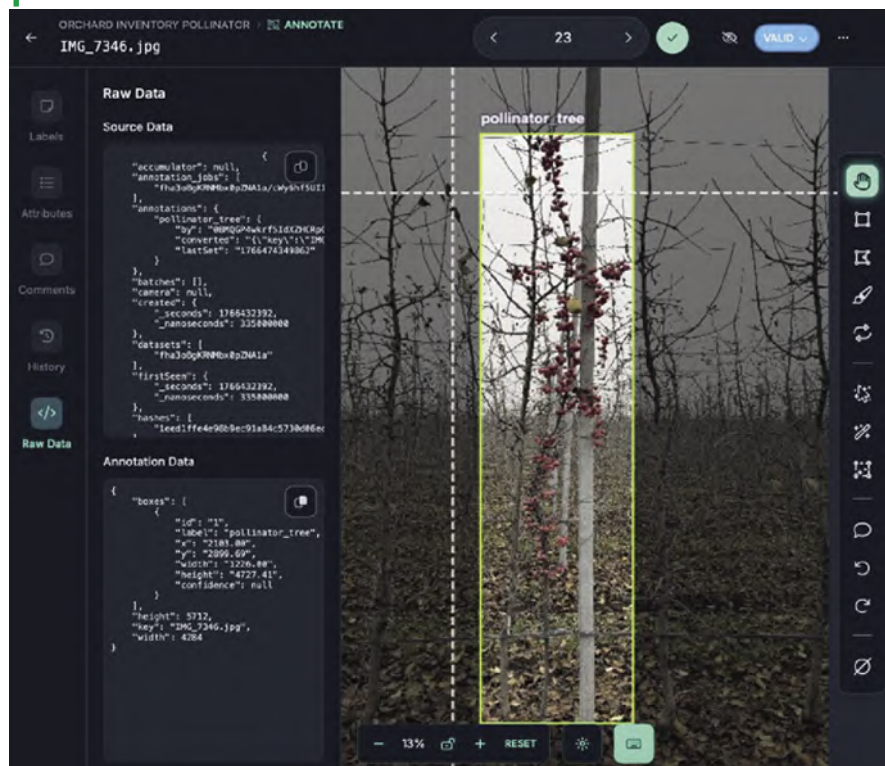
Для обучения и валидации модели RF-DETR в среде Roboflow был создан размеченный датасет с одним классом «pollinator_tree», соответствующим деревьям-опылителям. Аннотирование объектов выполнялось в полуавтоматическом режиме: система на основе алгоритмов компьютерного зрения предсказывала первичные области расположения деревьев, а эксперт-агроном проводил окончательную верификацию и корректировку границ ограничивающих рамок (bounding box) на основе ключевого визуального признака — наличия сохранившихся плодов в кроне деревьев-опылителей (рис.3).

С целью увеличения разнообразия данных и повышения устойчивости модели были применены

методы аугментации: случайные повороты, отражения, изменения яркости и контрастности, а также добавление размытия [15]. Итоговый датасет после аугментации составил 2500 изображений. Для оценки согласованности разметки выборочно был проведен независимый контроль вторым

Рис. 3. Разметка изображений

Fig. 3. Image labeling



экспертом; среднее значение метрики IoU между соответствующими ограничивающими рамками двух экспертов превышало 0,95, что свидетельствует о высокой согласованности аннотаций. Подготовленный набор данных был разделен на обучающую (1750 изображений, 70%), валидационную (500 изображений, 20%) и тестовую (250 изображений, 10%) выборки и экспортирован в формате COCO для последующего использования в среде PyTorch. Объем выборки (2500 изображений после аугментации) и ее ограниченность по месту сбора (одно хозяйство, зимний период) были определены как достаточные для доказательства концепции применения трансформерной архитектуры RF-DETR в задаче распознавания деревьев-опылителей. Это позволило минимизировать вариабельность условий съемки и обеспечить высокую согласованность разметки ($\text{IoU} > 0,95$), что важно для проведения сравнительного анализа конфигураций модели. Полученные результаты следует рассматривать как базовый уровень точности, а дальнейшее масштабирование датасета за счет включения данных из различных агроклиматических зон, типов садов и сезонных периодов является необходимым этапом на пути к созданию промышленного решения.

В рамках исследования были обучены и протестированы все конфигурации модели RF-DETR (Nano, Small, Medium, Large). Итоговый выбор модели для анализа основывался на оптимальном соотношении между метрикой точности AP@50:95 на валидационной выборке и скоростью вывода (FPS), соответствующей требованиям мониторинга в реальном времени. Для обучения всех конфигураций модели RF-DETR (производитель компания «Roboflow», США) был использован оптимизатор AdamW с параметрами $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,999$ и $\text{weight decay} = 0,0001$, начальная скорость обучения (learning rate) установлена равной 10^{-4} . Размер входного изображения составлял 640×640 пикселей. Размер пакета данных (batch size) был установлен равным 8 для конфигурации Large и 16 для менее ресурсоемких моделей (Nano, Small, Medium) из-за ограничений видеопамати. Для предотвращения переобучения применялось раннее прекращение обучения (early stopping) при отсутствии улучшения метрики на валидационной выборке в течение 15 эпох.

Для оптимизации модели использована комбинированная функция потерь (формула 1):

$$L_{\text{DETR}} = \lambda_{\text{cls}} \times L_{\text{cls}} + \lambda_{\text{bbox}} \times (\lambda_{L1} \times L_{L1} + \lambda_{\text{giou}} \times L_{\text{giou}}), \quad (1)$$

где: L_{cls} — функция потерь для классификации, λ_{L1} — L1-норма разницы между предсказанными и истинными координатами рамки, λ_{giou} — потери на основе обобщённого IoU, обеспечивающие более точную регрессию ограничивающих рамок, λ_{cls} , λ_{bbox} , λ_{L1} , λ_{giou} — весовые коэффициенты, задающие баланс между компонентами потерь (в стандартной

реализации архитектуры используются значения 1, 5, 5 и 2 соответственно).

Функция потерь для классификации оценивает корректность присвоения объекту предсказанного класса, а функция потерь для регрессии ограничивающих рамок оценивает точность координат предсказанной ограничивающей рамки относительно эталонной разметки.

Качество распознавания оценивалось на тестовой выборке с использованием метрик для задачи компьютерного зрения [16]. Для оценки точности локализации объектов использовалась метрика Intersection over Union (IoU) (формула 2):

$$\text{IoU}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \quad (2)$$

где: A — предсказанная ограничивающая рамка (bounding box), B — истинная рамка (ground truth). Метрика принимает значения от 0 (нет пересечения) до 1 (полное совпадение).

Основные метрики распознавания вычислялись на основе матрицы ошибок (формула 3):

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}, \quad \text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \quad (3)$$

где: TP (True Positive) — количество верно обнаруженных деревьев-опылителей, FP (False Positive) — ложные срабатывания, FN (False Negative) — пропущенные объекты.

Для сравнения моделей использована метрика средней точности (Average Precision, AP), определяемая как площадь под кривой Precision-Recall (формула 4):

$$\text{AP} = \int_0^1 p(r) dr, \quad (4)$$

где: $p(r)$ — функция точности от полноты. Использовано дискретное усреднение значений точности при различных порогах уверенности модели. В работе использовались пороги $\text{IoU} = 0.5$ (AP@50) и усреднённое значение по порогам от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05 (AP@50:95).

Производительность моделей (скорость инференса) оценивалась в кадрах в секунду (FPS) и рассчитывалась по формуле 5:

$$\text{FPS} = \frac{N}{T}, \quad (5)$$

где: N — общее количество изображений в тестовой выборке, T — суммарное время обработки всех изображений. Соответственно, среднее время обработки одного изображения составляет $t_{\text{кадра}} = T/N$.

Эксперименты по обучению и валидации моделей RF-DETR проводились в облачной среде Google Colab (правообладатель компания

«Google», США). Вычисления выполнялись на графическом процессоре (GPU) NVIDIA Tesla T4 с 16 ГБ видеопамяти. Использован центральный процессор (CPU) Intel Xeon с тактовой частотой 2,2 ГГц (4 ядра). Объем оперативной памяти (RAM) составлял 13 ГБ. Программная среда включала операционную систему Linux 6.6.105 (правообладатель «The Linux Foundation», США), использован интерпретатор Python 3.12.12 (правообладатель «Python Software Foundation», США), а также фреймворк глубокого обучения PyTorch 2.9.0 (правообладатель Meta AI, США) с поддержкой CUDA 12.6 (NVIDIA, США) для эффективных вычислений на GPU.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Для оценки процесса обучения и сходимости модели RF-DETR Medium был проведен анализ динамики изменения ключевых метрик в течение 30 эпох обучения.

На рисунках 4–6 представлены графики изменения функции потерь, средней точности (AP@50:95) и среднего полноты (AR@50:95) в зависимости от количества эпох.

На каждом графике приведены две кривые: Base model (базовая модель) и EMA модель (модель с экспоненциальным скользящим средним). Base model показывает текущее состояние сети после обновления весов через градиентный спуск, тогда как EMA модель формирует усредненное представление весов, комбинируя параметры из всех предыдущих шагов обучения. Такой подход минимизирует влияние случайных колебаний в процессе обучения, повышает обобщающую способность модели и обеспечивает стабильные результаты при работе с новыми данными.

EMA-версия показала превосходство над базовой моделью начиная с 5-й эпохи по всем ключевым показателям. Значения метрик достигают стабильных значений после 10-и эпох обучения, сохраняя незначительные улучшения до 30-й эпохи. Стратегия ранней остановки (early stopping) была применена после 15 эпох, когда улучшения на валидационной выборке отсутствовали более 15 последовательных итераций.

Результаты экспериментов показывают последовательное улучшение

Рис. 4. Изменение функции потерь в процессе обучения модели RF-DETR Medium

Fig. 4. Loss Function Modification during RF-DETR Medium Training

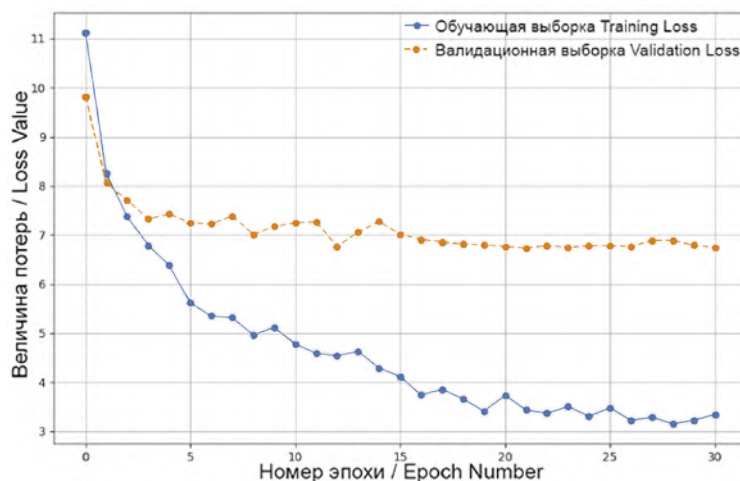


Рис. 5. Изменение метрики средней точности (AP@50:95) при обучении модели RF-DETR Medium

Fig. 5. Change in the Average Precision (AP@50:95) metric during the training of the RF-DETR Medium model

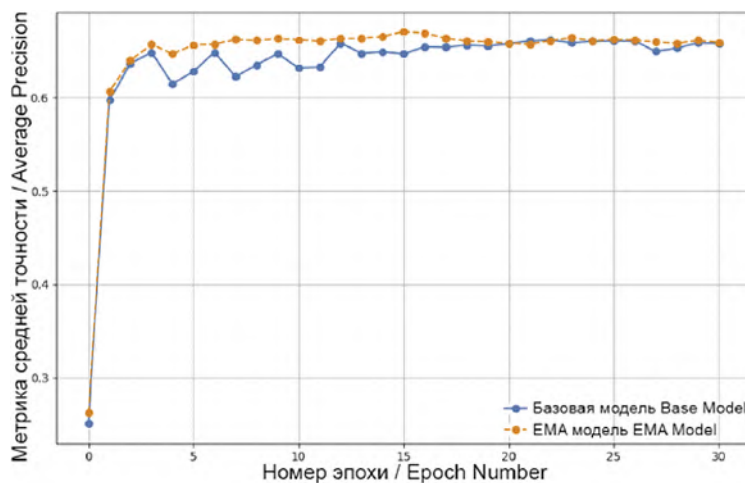


Рис. 6. Изменение метрики средней полноты (AR@50:95) при обучении модели RF-DETR Medium

Fig. 6. Change in the Average Recall (AR@50:95) metric during the training of the RF-DETR Medium model

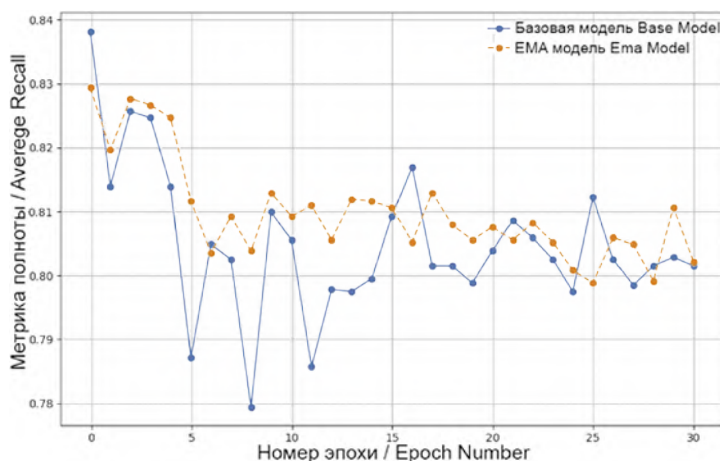


Таблица 1. Результаты обучения трансформерных моделей глубокого обучения RF-DETR

Table 1. Training results of the RF-DETR deep transformer models

Метрика	Модель RF-DETR Nano	Модель RF-DETR Small	Модель RF-DETR Medium	Модель RF-DETR Large
Точности (Precision)	0,937	0,948	0,957	0,968
Полнота (Recall)	0,915	0,928	0,940	0,955
Средняя точность mAP@ IoU = 0,50:0,95	0,618	0,635	0,658	0,682
Средняя точность mAP@ IoU = 0,50	0,945	0,954	0,965	0,981
Общая функция потерь на тестовой выборке (Total test loss)	4,835	4,217	3,895	3,620
Ошибка классификации объектов (Classification loss)	0,512	0,495	0,482	0,468
Ошибка предсказания координат ограничивающих рамок (Bounding box loss)	0,521	0,489	0,465	0,432
Обобщенная функция потерь (GloU loss)	0,372	0,359	0,341	0,325
Время инференса, мс	85	124	170	432
FPS	11,8	8	5,9	2,3

метрик качества с ростом вычислительной сложности моделей (табл. 1).

Модель RF-DETR Nano, являясь самой легковесной (30,5 млн. параметров), показала $mAP@50:95 = 0,618$ и $mAP@50 = 0,945$ при высокой скорости обработки изображений (11,8 FPS). Модель RF-DETR Small (32,1 млн. параметров) показала улучшение точности ($mAP@50:95 = 0,635$; $mAP@50 = 0,954$) при скорости 8 FPS. Модель RF-DETR Medium (33,7 млн. параметров) достигла $mAP@50:95 = 0,658$ и $mAP@50 = 0,965$ при скорости 5,9 FPS. Хотя модель RF-DETR Large (135,6 млн. параметров) показала наивысшую точность ($mAP@50:95 = 0,682$; $mAP@50 = 0,981$), ее скорость обработки значительно ниже (2,3 FPS). На практике это означает, что при обработке 3000 изображений модель версии Medium завершит анализ за 8,5 минут, в то время как модели версии Large потребуется 21,7 минуты. Анализ функции потерь выявил закономерное уменьшение всех компонентов (составляющих) с ростом сложности модели.

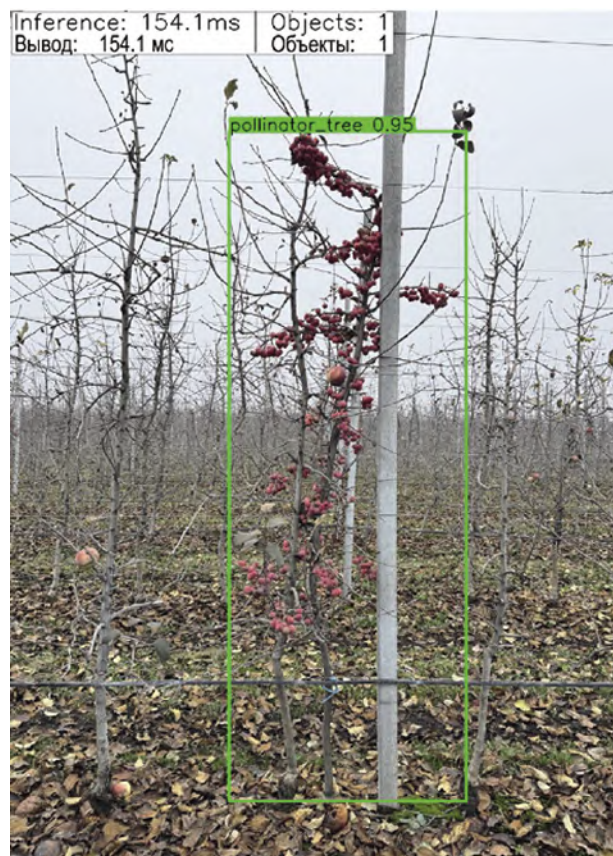
В результате для практической реализации системы мониторинга была выбрана EMA-версия модели RF-DETR Medium, показавшая наилучшие результаты при тестировании. Выбор модели Medium обусловлен оптимальным соотношением точности и производительности: она обеспечивает достаточную для практических задач точность ($mAP@50:95 = 0,658$) при приемлемой скорости обработки, что позволяет анализировать изображения садовых насаждений в реальном времени.

Примеры результатов распознавания деревьев-опылителей моделью RF-DETR Medium представлены на рисунке 7.

Анализ ошибок моделей показал, что основными факторами, затруднявшими распознавание, стали сложный визуальный фон и неоднородность условий съемки: садовые насаждения включают множество структурно схожих объектов (ветви, стволы, остатки листьев, опорные конструкции), которые создают шум особенно при ограниченном разрешении или низком освещении. Даже в зимний период, когда листва отсутствует, ветви деревьев часто перекрывают друг

Рис. 7. Пример результата распознавания дерева-опылителя моделью RF-DETR Medium. Фотография сделана авторами в промышленных насаждениях ООО «Зоринский сад»

Fig. 7. An example of pollinator tree recognition by the RF-DETR Medium model. The photo was taken by the authors in the industrial plantings of LLC «Zorinsky Garden»



друга в густых посадках, что затрудняет их надежное распознавание и снижает метрику полноты модели. Комбинированное использование БЛА и наземных платформ, несмотря на расширение вариативности обзора, дополнительно приводит к вариациям по ракурсу и масштабу. Кроме того, деревья-опылители встречаются значительно реже основного сорта, что приводит к дисбалансу классов и смещению модели в сторону снижения ложных срабатываний за счет метрики полноты. Эти особенности объясняют, почему, несмотря на

высокие значения метрики AP@50 ($> 0,95$), метрика AP@50:95 остаётся умеренной ($\sim 0,635-0,682$): модель уверенно обнаруживает объекты при пороге уверенности IoU = 0,5, но сталкивается с трудностями в точной локализации ограничивающих рамок при более высоких требованиях к совпадению предсказания и разметки ($\text{IoU} \geq 0,75$). Тем не менее, применение трансформерной архитектуры FR-DETR позволило в значительной степени компенсировать эти ограничения за счет глобального контекстного анализа и устойчивости к визуальному шуму, что подтверждает перспективность метода для задач цифрового мониторинга.

Следует отметить, что предложенный метод на данном этапе базируется на визуальном признаке, доступном в зимний период (наличие сохранившихся плодов на деревьях-опылителе). Такое методологическое решение позволило минимизировать сопутствующие факторы (перекрытие крон, листва, блики) и оценить эффективность архитектуры RF-DETR. Вместе с тем, используемая трансформерная архитектура не ограничена работой с одним признаком, ее способность к глобальному контекстному анализу позволяет в дальнейшем расширить набор распознаваемых признаков (фенологические особенности, морфология кроны и др.) для идентификации опылителей в весенне-летний период. Формирование мульти-сезонного датасета и дообучение модели на комбинации признаков является следующим этапом развития системы круглогодичного мониторинга.

Для практической апробации разработанного метода обученная модель RF-DETR Medium была применена для анализа видеозаписи ряда промышленного сада. Ряд длиной 220 метров при расстоянии между деревьями 0,8 м включает 275 деревьев. Согласно агротехническому регламенту хозяйства, схема посадки предполагает размещение одного дерева-опылителя после каждых 10 деревьев основного сорта в ряду. При такой схеме ожидаемое (плановое) количество опылителей в ряду составляет 25 шт.

Таблица 2. Анализ интервалов с дефицитом деревьев-опылителей в контрольном ряду

Table 2. Analysis of intervals with pollinator tree deficit in the control row

Интервал в ряду	Координаты интервала	Длина интервала между опылителями, м	Количество деревьев основного сорта в интервале (расчетное), шт	Расчетное количество недостающих деревьев-опылителей в интервале, шт
Интервал 1 (начало ряда — Опылитель А)	N 51.174548°, E 36.414187	11,2	14	0
Интервал 3 (Опылитель Б — Опылитель В)	N 51.174442°, E 36.414224	25,6	32	2
Интервал 5 (Опылитель Г — Опылитель Д)	N 51.174359°, E 36.414281	12,0	15	1
Интервал N-1 (Опылитель У — Опылитель Ф)	N 51.171936°, E 36.415452	10,4	13	0
Интервал N (Опылитель Ф — конец ряда)	N 51.171793°, E 36.415477	12,8	16	0

Модель успешно распознала 22 дерева-опылителя, что впоследствии было подтверждено путём проверки видеозаписи; ложные срабатывания и пропуски зафиксированы не были. Это позволило определить общий количественный дефицит в 3 дерева (Табл. 2).

На основе анализа распределения деревьев-опылителей рекомендовано разместить 2 дерева на наиболее проблемном Интервале 3 и 1 дерево на Интервале 5.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциале использования трансформерных моделей для перехода от субъективных и трудоемких методов учета к автоматизированным, обеспечивающим, как показало исследование, масштабируемый анализ. Это создает предпосылки для интеграции разработанного метода в системы точного земледелия, где данные о фактическом размещении опылителей могут послужить основой для принятия более обоснованных агротехнических решений [17], например, при планировании посадки деревьев в зонах с их дефицитом или при закладке новых насаждений.

Выводы/Conclusions

В результате исследования подтверждена эффективность применения трансформерных моделей глубокого обучения, в частности архитектуры RF-DETR, для автоматизированного распознавания деревьев-опылителей в условиях промышленного садоводства. Предложенный метод, основанный на анализе изображений, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов и наземных платформ, показывает высокую точность распознавания.

Модель RF-DETR Medium показала высокую точность распознавания деревьев-опылителей по визуальному признаку, что свидетельствует об ее устойчивости к варьированию условий освещения, ракурсов съёмки и фонового шума. Соотношение точности ($mAP@50:95 = 0,658$) и скорости обработки (5,9 FPS) делает эту модель оптималь-

ным выбором для практического применения, обеспечивая баланс между высокой точностью распознавания и достаточной производительностью для работы в режиме реального времени. Сочетание характеристик позволяет использовать модель как на бортовых компьютерах роботизированных систем, так и для обработки данных на серверном оборудовании.

Предложенный метод представляет собой практически применимый инструмент цифрового мониторинга, способствующий повышению эффективности опыления и, как следствие, устойчивости и продуктивности садовых насаждений.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, тема № FGUN-2025-0011 Разработать инновационные технологии и технические средства для автоматизации и роботизации процессов в садоводстве и питомниководстве

FUNDING

The research was carried out within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM), Theme No. FGUN-2025-0011 To develop innovative technologies and technical means for the automation and robotization of processes in gardening and nursery farming

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Gilpin A.-M., Kobel C., Brettell L.E., O'Brien C., Cook J.M., Power S.A. Co-Flowering Species Richness Increases Pollinator Visitation to Apple Flowers. *Agriculture*. 2022; 12(8): 1246. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081246>
- Meissle M., Waldburger M., Jeanneret P., Broggin G.A.L., Patocchi A., Romeis J. Insect Pollinator Monitoring in and around a Netted Plot of Apple Trees—Biosafety Implications for Genetically Engineered Fruit Trees. *Agronomy*. 2023; 13(1): 84. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010084>
- Elsysy M., Ebrahimi A., Einhorn T. Wind Pollination of Apple Flowers Under Insect Exclusion Nets Questions the Insect-Dependent Pollination Model of Modern Apple Plantations. *Plants*. 2025; 14(8): 1196. <https://doi.org/10.3390/plants14081196>
- Roeder S., Serra S., Musacchi S. Effective Pollination Period and Parentage Effect on Pollen Tube Growth in Apple. *Plants*. 2021; 10(8): 1618. <https://doi.org/10.3390/plants10081618>
- Zhu Y. et al. Identification of Apple Orchard Planting Year Based on Spatiotemporally Fused Satellite Images and Clustering Analysis of Foliage Phenophase. *Remote Sensing*. 2020; 12(7): 1199. <https://doi.org/10.3390/rs12071199>
- Li H., Tan B., Sun L., Liu H., Zhang H., Liu B. Multi-Source Image Fusion Based Regional Classification Method for Apple Diseases and Pests. *Applied Sciences*. 2024; 14(17): 7695. <https://doi.org/10.3390/app14177695>
- Фёдоров Д.Е., Быков С.Н. Мониторинг посевов гороха с нейросетевой обработкой изображений, полученных с использованием БПЛА. *Аграрная наука*. 2025; (8): 122–128. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-122-128>
- Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Филиппов Р.А., Вершинин Р.В. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020; 67(1): 133–141. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>
- Liu Q., Meng H., Zhao R., Ma X., Zhang T., Jia W. Green Apple Detector Based on Optimized Deformable Detection Transformer. *Agriculture*. 2025; 15(1): 75. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010075>
- Robinson I., Robicheaux P., Popov M., Ramanan D., Peri N. RF-DETR: Neural Architecture Search for Real-Time Detection Transformers. *arXiv*. 2025; 2511.09554. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.09554>
- Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Андриянов Н.А. Сравнительный анализ моделей нейронных сетей для распознавания плодов яблони на кроне дерева. *Садоводство и виноградарство*. 2023; (5): 56–63. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-56-63>
- Liu Z., Wu D., Xu F., Du Z., Luo R., Li C. MSHLB-DETR: Transformer-Based Multi-Scale Citrus Huanglongbing Detection in Orchards with Aggregation Enhancement. *Horticulturae*. 2025; 11(10): 1225. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11101225>
- Kaviani M., Leblon B., Akilan T., Amishev D., LaRocque A., Haddadi A. Tree Health Assessment Using Mask R-CNN on UAV Multispectral Imagery over Apple Orchards. *Remote Sensing*. 2025; 17(19): 3369. <https://doi.org/10.3390/rs17193369>
- Wang M., Li F. Real-Time Accurate Apple Detection Based on Improved YOLOv8n in Complex Natural Environments. *Plants*. 2025; 14(3): 365. <https://doi.org/10.3390/plants14030365>
- Lee S., Lee S. Efficient Data Augmentation Methods for Crop Disease Recognition in Sustainable Environmental Systems. *Big Data and Cognitive Computing*. 2025; 9(1): 8. <https://doi.org/10.3390/bdcc9010008>

REFERENCES

- Gilpin A.-M., Kobel C., Brettell L.E., O'Brien C., Cook J.M., Power S.A. Co-Flowering Species Richness Increases Pollinator Visitation to Apple Flowers. *Agriculture*. 2022; 12(8): 1246. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081246>
- Meissle M., Waldburger M., Jeanneret P., Broggin G.A.L., Patocchi A., Romeis J. Insect Pollinator Monitoring in and around a Netted Plot of Apple Trees—Biosafety Implications for Genetically Engineered Fruit Trees. *Agronomy*. 2023; 13(1): 84. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010084>
- Elsysy M., Ebrahimi A., Einhorn T. Wind Pollination of Apple Flowers Under Insect Exclusion Nets Questions the Insect-Dependent Pollination Model of Modern Apple Plantations. *Plants*. 2025; 14(8): 1196. <https://doi.org/10.3390/plants14081196>
- Roeder S., Serra S., Musacchi S. Effective Pollination Period and Parentage Effect on Pollen Tube Growth in Apple. *Plants*. 2021; 10(8): 1618. <https://doi.org/10.3390/plants10081618>
- Zhu Y. et al. Identification of Apple Orchard Planting Year Based on Spatiotemporally Fused Satellite Images and Clustering Analysis of Foliage Phenophase. *Remote Sensing*. 2020; 12(7): 1199. <https://doi.org/10.3390/rs12071199>
- Li H., Tan B., Sun L., Liu H., Zhang H., Liu B. Multi-Source Image Fusion Based Regional Classification Method for Apple Diseases and Pests. *Applied Sciences*. 2024; 14(17): 7695. <https://doi.org/10.3390/app14177695>
- Fedorov D.E., Bykov S.N. Monitoring of pea crops with neural network processing of images obtained using UAVs. *Agrarian science*. 2025; (8): 122–128 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-122-128>
- Khort D.O., Kutuyev A.I., Smirnov I.G., Filippov R.A., Verшинin R.V. Developing algorithms for a berry recognition system used in robotized harvesting of garden strawberry. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2020; 67(1): 133–141 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>
- Liu Q., Meng H., Zhao R., Ma X., Zhang T., Jia W. Green Apple Detector Based on Optimized Deformable Detection Transformer. *Agriculture*. 2025; 15(1): 75. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010075>
- Robinson I., Robicheaux P., Popov M., Ramanan D., Peri N. RF-DETR: Neural Architecture Search for Real-Time Detection Transformers. *arXiv*. 2025; 2511.09554. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.09554>
- Kutuyev A.I., Smirnov I.G., Andriyanov N.A. Neural network models of apple fruit identification in tree crowns: comparative analysis. *Horticulture and viticulture*. 2023; (5): 56–63 (in Russian). <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-56-63>
- Liu Z., Wu D., Xu F., Du Z., Luo R., Li C. MSHLB-DETR: Transformer-Based Multi-Scale Citrus Huanglongbing Detection in Orchards with Aggregation Enhancement. *Horticulturae*. 2025; 11(10): 1225. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11101225>
- Kaviani M., Leblon B., Akilan T., Amishev D., LaRocque A., Haddadi A. Tree Health Assessment Using Mask R-CNN on UAV Multispectral Imagery over Apple Orchards. *Remote Sensing*. 2025; 17(19): 3369. <https://doi.org/10.3390/rs17193369>
- Wang M., Li F. Real-Time Accurate Apple Detection Based on Improved YOLOv8n in Complex Natural Environments. *Plants*. 2025; 14(3): 365. <https://doi.org/10.3390/plants14030365>
- Lee S., Lee S. Efficient Data Augmentation Methods for Crop Disease Recognition in Sustainable Environmental Systems. *Big Data and Cognitive Computing*. 2025; 9(1): 8. <https://doi.org/10.3390/bdcc9010008>

16. Maxwell A.E., Warner T.A., Guillén L.A. Accuracy Assessment in Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Remote Sensing Studies—Part 1: Literature Review. *Remote Sensing*. 2021; 13(13): 2450.
<https://doi.org/10.3390/rs13132450>

17. Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Воронков И.В. Разработка системы автоматизированного управления агротехнологиями в садоводстве. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021; 15(2): 61–68.
<https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68>

ОБ АВТОРАХ

Алексей Игоревич Кутырёв

кандидат технических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных цифровых систем мониторинга, диагностики и управления процессами в сельскохозяйственном производстве, ведущий научный сотрудник
alexeykutyrev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7643-775X>

Игорь Геннадьевич Смирнов

доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий отделом технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства, главный научный сотрудник
rashn-smirnov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Россия

16. Maxwell A.E., Warner T.A., Guillén L.A. Accuracy Assessment in Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Remote Sensing Studies—Part 1: Literature Review. *Remote Sensing*. 2021; 13(13): 2450.
<https://doi.org/10.3390/rs13132450>

17. Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Voronkov I.V. Development of an Automated Management System for Agricultural Technologies in Horticulture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021; 15(2): 61–68 (in Russian).
<https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68>

ABOUT THE AUTHORS

Alexey Igorevich Kutyrev

Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Intelligent Digital Systems for Monitoring, Diagnostics and Process Management in Agricultural Production, Leading Researcher
alexeykutyrev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7643-775X>

Igor Gennadievich Smirnov

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Technologies and Machines for Horticulture, Viticulture and Nursery Breeding, Chief researcher
rashn-smirnov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9992-1261>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
5 1st Institute Passage, Moscow, 109428, Russia



AGRO PACK TURKMENISTAN

**5-я Международная выставка
пищевой промышленности,
упаковки и сельского хозяйства**

12-14 Мая 2026

📍 Конгресс Холл, здание ТПП Туркменистана
ул. Чандыбиль / Ашгабад



sofuar | **net**
organization

🌐 agro-pack.com
☎ +90 536 745 01 40

Реклама

УДК 631.171:004.896

Краткое сообщение



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-137-143

С. П. Оськин ✉

А. В. Кузнецов

Н. Е. Конева

Московский политехнический университет (Мосполитех), Москва, Россия

✉ sv-oskin@yandex.ru

Поступила в редакцию: 10.02.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Оськин С.П., Кузнецов А.В., Конева Н.Е.

Функциональное моделирование и параметрическая оценка компонентов IoT-системы сбора данных для задач точного земледелия

РЕЗЮМЕ

В статье рассматривается разработка функциональной модели автоматизированной системы сбора и обработки данных IoT-мониторинга для задач точного земледелия с использованием методологии структурного анализа IDEF0. Объектом моделирования выступает аппаратно-программный комплекс, включающий полевые IoT-сенсоры, каналы передачи данных и серверную инфраструктуру обработки. Построена контекстная диаграмма уровня A-0 и выполнена декомпозиция до уровня A0, включающая четыре функциональных блока: сбор первичных данных с датчиков, предобработка и агрегация на граничном шлюзе, передача данных по беспроводным протоколам и серверная обработка с формированием управляющих воздействий. Проведен сравнительный анализ технических характеристик IoT-сенсоров трех типов (датчики влажности почвы, метеостанции, мультиспектральные камеры БПЛА) по параметрам точности, частоты опроса и энергопотребления. Выполнена оценка производительности трех протоколов передачи данных (LoRa, NB-IoT, Wi-Fi) по критериям пропускной способности, дальности и латентности. Экспериментальные замеры выполнены на базе 12 хозяйств Краснодарского края в 2019–2024 гг. Результаты показали, что протокол LoRa обеспечивает оптимальное соотношение дальности передачи (до 11,2 км) и энергопотребления (42 мА в режиме передачи) для полевых условий. Среднее время цикла обработки данных от сенсора до формирования управляющей команды составило 8,3 с. Разработанная функциональная модель формализует информационные потоки и управляющие воздействия в системе IoT-мониторинга, обеспечивая основу для проектирования автоматизированных систем в агроинженерии.

Ключевые слова: IDEF0, IoT-мониторинг, точное земледелие, функциональное моделирование, архитектура системы, протоколы передачи данных, агроинженерия, автоматизированная система

Для цитирования: Оськин С.П., Кузнецов А.В., Конева Н.Е. Функциональное моделирование и параметрическая оценка компонентов IoT-системы сбора данных для задач точного земледелия. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 137–143. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-137-143>

Short communications



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-137-143

Svyatoslav P. Oskin ✉

Aleksandr V. Kuznetsov

Natalya E. Koneva

Moscow Polytechnic University (Mospolitech), Moscow, Russia

✉ sv-oskin@yandex.ru

Received by the editorial office: 10.02.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Oskin S.P., Kuznetsov A.V., Koneva N.E.

Functional modeling and parametric evaluation of components of an IoT data collection system for precision agriculture

ABSTRACT

The article considers the development of a functional model of an automated IoT monitoring data acquisition and processing system for precision agriculture tasks using the IDEF0 structural analysis methodology. The modeling object is a hardware-software complex including field IoT sensors, data transmission channels, and server processing infrastructure. A context diagram at level A-0 was constructed and decomposition to level A0 was performed, including four functional blocks: primary data acquisition from sensors, preprocessing and aggregation at the edge gateway, wireless data transmission, and server processing with control action generation. A comparative analysis of technical characteristics of three types of IoT sensors (soil moisture sensors, weather stations, UAV multispectral cameras) was conducted by accuracy, polling frequency, and power consumption parameters. Performance evaluation of three data transmission protocols (LoRa, NB-IoT, Wi-Fi) was performed by throughput, range, and latency criteria. Experimental measurements were carried out at 12 farms in Krasnodar Krai during 2019–2024. Results showed that the LoRa protocol provides the optimal ratio of transmission range (up to 11.2 km) and power consumption (42 mA in transmission mode) for field conditions. The average data processing cycle time from sensor to control command generation was 8.3 s. The developed functional model formalizes information flows and control actions in the IoT monitoring system, providing a basis for designing automated systems in agroengineering.

Key words: IDEF0, IoT monitoring, precision agriculture, functional modeling, system architecture, data transfer protocols, agroengineering, automated system

For citation: Oskin S.P., Kuznetsov A.V., Koneva N.E. Functional modeling and parametric evaluation of components of an IoT data collection system for precision agriculture. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 137–143 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-137-143>

Введение/Introduction

Цифровая трансформация агропромышленно-го комплекса Российской Федерации определена в качестве стратегического приоритета [1–4], в 2024 году расходы Минсельхоза России на развитие цифровых ИТ-систем составили 750 млн рублей, а технологии точного земледелия применяются на площадях свыше 20 млн га [5]. Внедрение IoT-сенсоров¹ обеспечивает непрерывный сбор данных о состоянии почвы, микроклимате и вегетации растений, формируя массивы информации, обработка которых требует формализованного описания информационных потоков и процедур управления [6–9].

Проектирование автоматизированных систем мониторинга сопряжено с необходимостью структурного описания взаимодействия аппаратных и программных компонентов [10]. Методология IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) обеспечивает формализацию функций системы, входных и выходных данных, управляющих воздействий и механизмов реализации [11, 12]. Применение IDEF0 к задачам агроинженерии позволяет декомпозировать процесс IoT-мониторинга на функциональные блоки с четко определенными интерфейсами, что является необходимым этапом при разработке технического задания на создание автоматизированных систем [13, 14].

Научная проблема — отсутствие формализованной функциональной модели полного цикла обработки данных IoT-мониторинга в точном земледелии, охватывающей этапы от физического съема показаний сенсоров до формирования управляющих воздействий на исполнительные механизмы [15].

Цель исследования — разработать функциональную модель автоматизированной системы сбора и обработки данных IoT-мониторинга в точном земледелии на основе методологии IDEF0 и провести сравнительную оценку технических характеристик ее компонентов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Методологическая основа — структурный анализ систем на базе стандарта IDEF0 (FIPS Publication 183)², дополненный методами планирования эксперимента³ [11] для оценки производительности компонентов системы.

Аппаратная база: датчики влажности почвы Decagon 5TM (METER Group, Inc., США; диапазон 0–100% VWC, точность ±3%); метеостанция Davis Vantage Pro2 (Davis Instruments Corp.,

США; температура, влажность воздуха, осадки, скорость ветра); мультиспектральные камеры MicaSense RedEdge-MX (AgEagle Aerial Systems, Inc., США) на БПЛА DJI Matrice 300 RTK (SZ DJI Technology Co., Ltd., Китай); граничные шлюзы на базе микроконтроллера ESP32-S3 (Espressif Systems Co., Ltd., Китай) с модулями LoRa SX1276 (Semtech Corporation, США); сервер обработки — промышленный ПК с процессором Intel Xeon E-2388G (Intel Corporation, США).

Объект исследования — 12 хозяйств Краснодарского края Российской Федерации, отобранных по следующим критериям: площадь пашни не менее 500 га, наличие зернопропашного севооборота (озимая пшеница, подсолнечник, кукуруза на зерно), возможность размещения автономных сенсорных узлов в полевых условиях, устойчивое покрытие сети GSM (для протокола NB-IoT).

Период наблюдений — 2019–2024 гг.

При интерпретации экспериментальных данных использованы статистические сведения Росстата об урожайности сельскохозяйственных культур⁴.

Программное обеспечение: операционная система реального времени FreeRTOS v10.5 (Amazon Web Services, Inc., США; лицензия MIT); протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) для передачи телеметрии; серверная обработка — Python 3.11 (Python Software Foundation, США; лицензия PSF) с использованием библиотек scikit-learn 1.3 и XGBoost 2.0 (лицензии BSD-3 и Apache 2.0 соответственно). Информационная база исследования включает публикации eLibrary.ru и Web of Science Core Collection за 2020–2025 гг. (проанализировано 48 источников). Отбор публикаций для списка литературы проводился по следующим критериям: индексация в РИНЦ (ядро), Web of Science или Scopus, соответствие тематике IoT-мониторинга, точного земледелия, функционального моделирования или методов планирования эксперимента, приоритет отдавался оригинальным исследованиям, опубликованным в рецензируемых журналах. Построение модели IDEF0 выполнено в нотации стандарта FIPS 183 с использованием CASE-средства Ramus Educational v1.1.0 (ООО «Рамус Софт», Россия; лицензия свободного ПО GPL v2). Контекстная диаграмма уровня A-0 определяет систему как единый функциональный блок «Сбор и обработка данных IoT-мониторинга» с входами, выходами, управлениями и механизмами. Название блока соответствует целевой функции моделируемой системы и задает границы моделирования в терминах стандарта FIPS 183, все процессы, связанные с получением, преобразованием и

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682237 Российская Федерация. Платформа визуализации показаний IoT-сенсоров : заявл. 17.08.2025 : опубл. 21.08.2025 / Д. В. Ковалев. — EDN OQZVFR.

² Integration Definition for Function Modeling (IDEF0). Federal Information Processing Standards Publication 183. National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, 1993. 128 p.

³ Oskin S.P., Kuznecov A.V., Berezin E.S. Two Level Full Factorial Experiments at a Regression Model of an Electronic Device Current-Voltage Characteristic Construction . Proceedings — 2023 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023. P. 894–899 DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272902

⁴ Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчёте на убранный площадь) : стат. данные / Росстат. — URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Urozhaynost.xlsx> (дата обращения: 05.02.2026)

использованием данных от IoT-сенсоров в контуре управления точным земледелием. Декомпозиция уровня А0 включает четыре функциональных блока: А1 — Сбор первичных данных с IoT-сенсоров; А2 — Предобработка и агрегация данных на граничном шлюзе; А3 — Передача данных по беспроводным каналам связи; А4 — Серверная обработка и формирование управляющих воздействий.

Каждый блок описывается в терминах ICOM (Input, Control, Output, Mechanism). Под протоколом беспроводной передачи данных в контексте настоящего исследования понимается совокупность правил и форматов, регламентирующих обмен информацией между полевым сенсорным узлом (граничным шлюзом) и серверной инфраструктурой по радиоканалу. Ключевыми характеристиками протокола, определяющими его пригодность для задач IoT-мониторинга в полевых условиях, являются: пропускная способность канала, максимальная дальность устойчивой связи, латентность доставки пакета и энергопотребление радиомодуля в режимах передачи и сна.

Оценка производительности протоколов передачи данных выполнена по результатам 540 экспериментальных замеров (3 протокола × 12 хозяйств × 15 серий измерений).

Среднее время цикла обработки:

$$T_{\text{cycle}} = t_{\text{acq}} + t_{\text{pre}} + t_{\text{tx}} + t_{\text{srv}},$$

где t_{acq} — время съема данных сенсором, с; t_{pre} — время предобработки на шлюзе, с; t_{tx} — время передачи данных, с; t_{srv} — время серверной обработки, с.

Пропускная способность канала:

$$C = V_{\text{data}} / t_{\text{tx}},$$

где V_{data} — объём передаваемых данных, байт; t_{tx} — время передачи, с.

Энергоэффективность узла:

$$E = (P_{\text{tx}} * t_{\text{tx}} + P_{\text{sleep}} * t_{\text{sleep}}) / N_{\text{packets}},$$

где P_{tx} — мощность в режиме передачи, мВт; P_{sleep} — мощность в режиме сна, мВт;

t_{sleep} — время нахождения в режиме сна, с; N_{packets} — число переданных пакетов.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты сравнительного анализа технических характеристик IoT-сенсоров представлены в таблице 1.

Измеряемые параметры (влажность и температура почвы, метеорологические показатели, спектральные характеристики растительного покрова) охватывают основные факторы, контролируемые в системах точного земледелия [5, 6].

Диаграмма декомпозиции уровня А0 модели IDEF0 (рис. 1) формализует четыре функциональных блока системы.

Блок А1 реализует физический съём данных с полевых сенсоров. Входы: физические сигналы датчиков (аналоговые и цифровые). Управления: регламент опроса (периодичность, приоритет каналов). Выходы: первичные цифровые отчёты в формате SDI-12 / UART. Механизмы: IoT-сенсоры (табл. 1).

Блок А2 выполняет предобработку на граничном шлюзе: фильтрацию выбросов (медианный фильтр, окно 5 отсчётов), интерполяцию пропусков, агрегацию и упаковку в формат JSON-пакета MQTT [6, 16].

Блок А3 обеспечивает передачу данных от граничного шлюза к серверу по одному из беспроводных протоколов (табл. 2).

Блок А4 реализует серверную обработку: прием пакетов MQTT-брокером, запись в базу данных временных рядов (InfluxDB), запуск моделей обработки и формирование управляющих команд для исполнительных механизмов (клапаны полива, дозаторы удобрений) [13, 14].

Результаты сравнительного анализа протоколов передачи данных (блок А3) представлены в таблице 2.

Данные таблицы 2 демонстрируют принципиальные различия протоколов по ключевым эксплуатационным параметрам. Протокол LoRa обеспечивает максимальную дальность передачи (11,2 км) при минимальном энергопотреблении (42 мА в режиме передачи, 1,5 мА в режиме сна), что определяет его пригодность для распределённых полевых сетей с автономным питанием [6]. При типовом цикле опроса (1 пакет / 15

Таблица 1. Технические характеристики IoT-сенсоров системы мониторинга

Table 1. Technical specifications of IoT sensors of the monitoring system

Параметр	Decagon 5TM	Davis Vantage Pro2	MicaSense RedEdge-MX
Измеряемая величина	Влажность почвы, температура почвы	Температура воздуха, влажность, осадки, ветер	Мультиспектральное изображение (5 каналов)
Диапазон измерения	0–100% WWC; –40...+60 °C	–40...+65 °C; 0–100% RH; 0–999 мм	475–840 нм
Точность	±3% WWC; ±1 °C	±0,5 °C; ±3% RH; ±4% осадки	Радиометрическая калибровка ±2%
Частота опроса	1 раз / 15 мин	1 раз / 5 мин	1 кадр / 2 с (при полёте)
Интерфейс	SDI-12	USB / Serial	Wi-Fi / SD-карта
Энергопотребление	0,3 мА (измерение); 0,03 мА (сон)	0,9 мА (среднее)	4,2 Вт (съёмка)

Примечание: WWC — объемная влажность почвы; RH — относительная влажность воздуха. Источник: технические паспорта оборудования, данные экспериментальных замеров.

Рисунок 1. Диаграмма декомпозиции уровня A0 функциональной модели IDEF0 системы сбора и обработки данных IoT-мониторинга

Figure 1. Decomposition diagram of level A0 of the IDEF0 functional model of the IoT monitoring data acquisition and processing system

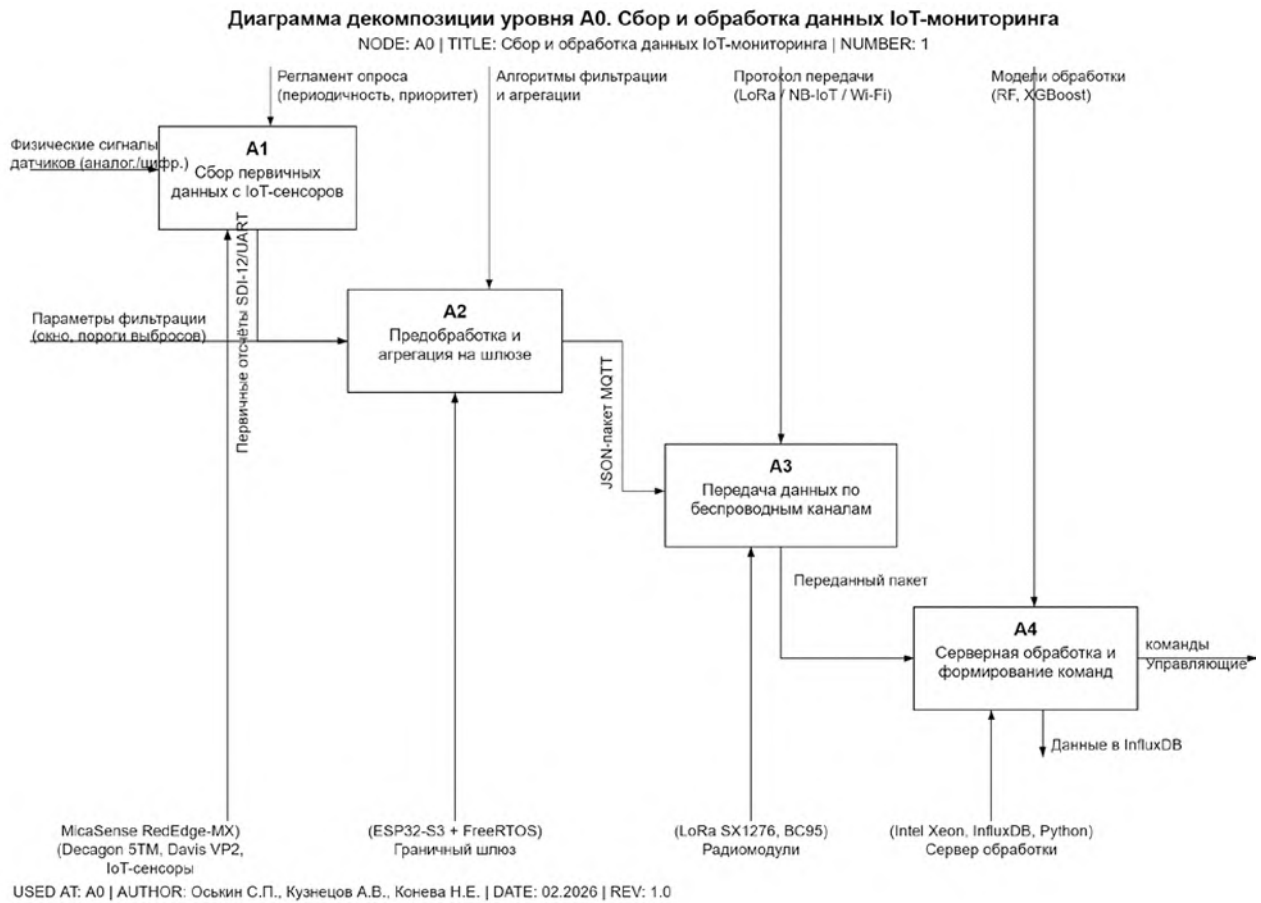


Таблица 2. Сравнительная оценка протоколов беспроводной передачи данных в системе IoT-мониторинга

Table 2. Comparative assessment of wireless data transmission protocols in the IoT monitoring system

Параметр	LoRa (SX1276)	NB-IoT (BC95)	Wi-Fi (ESP32)
Рабочая частота, МГц	868	900	2400
Пропускная способность, кбит/с	5,47	62,5	72 000
Дальность в полевых условиях, км	11,2	8,4	0,12
Латентность (средн.), мс	1 240	870	15
Ток передачи, мА	42	120	240
Ток в режиме сна, мкА	1,5	5,0	20
Размер пакета данных, байт	256	1 600	65 535
Стоимость модуля, руб.	320	890	180

Примечание: дальность измерена при прямой видимости, высота антенны 2 м; латентность — среднее по 180 замерам на протокол; стоимость — розничная, по состоянию на 01.2026. Источник: экспериментальные замеры авторов, 2024 г.

мин) расчетный срок автономной работы узла на батарее ёмкостью 3400 мА/ч составляет 14,6 месяцев. Протокол NB-IoT обеспечивает бóльшую пропускную способность (62,5 кбит/с) и меньшую латентность (870 мс), однако требует наличия инфраструктуры сотового оператора и характеризуется трёхкратным увеличением тока передачи [16]. Wi-Fi применим исключительно для локальных задач (граничный шлюз — локальный сервер) ввиду ограниченной дальности (0,12 км), однако обеспечивает передачу больших объёмов данных, включая мультиспектральные снимки БПЛА [14].

Результаты замеров временных характеристик полного цикла обработки данных (блоки A1–A4) представлены в таблице 3.

Данные таблицы 3 показывают, что наибольшую долю в суммарном времени цикла составляет серверная обработка (блок A4 — 40,5%), что обусловлено записью в базу данных и запуском модели машинного обучения [13]. Время передачи данных (блок A3 — 34,6%) определяется характеристиками протокола LoRa (табл. 2). Предобработка на шлюзе (блок A2 — 14,8%) включает медианную фильтрацию и упаковку пакета. Съём данных с сенсоров (блок A1 — 10,1%) лимитирован временем аналого-цифрового преобразования и интерфейсом SDI-12 [11].

Среднее время полного цикла 8,30 с удовлетворяет требованиям агроинженерных систем реального времени, где допустимая задержка управляющего воздействия составляет 30–60 с [5, 10]. Коэффициент вариации полного цикла (17,1%) указывает на стабильность функционирования системы в полевых условиях.

Среднее время полного цикла 8,30 с удовлетворяет требованиям агроинженерных систем реального времени, где допустимая задержка управляющего воздействия составляет 30–60 с [5, 10]. Коэффициент вариации полного цикла (17,1%) указывает на стабильность функционирования системы в полевых условиях.

Таблица 3. Временные характеристики цикла обработки данных по функциональным блокам IDEF0

Table 3. Time characteristics of the data processing cycle by IDEF0 functional blocks

Функциональный блок	Среднее время, с	Станд. откл., с	Мин., с	Макс., с
A1 — Сбор данных с сенсоров	0,84	0,12	0,61	1,18
A2 — Предобработка на шлюзе	1,23	0,31	0,72	2,14
A3 — Передача данных (LoRa)	2,87	0,64	1,94	4,52
A4 — Серверная обработка	3,36	0,89	1,81	5,73
Полный цикл (A1–A4)	8,30	1,42	5,84	12,31

Примечание: замеры выполнены при использовании протокола LoRa, 540 экспериментов; серверная обработка включает запись в InfluxDB и запуск модели Random Forest.

Максимальное время (12,31 с) зафиксировано при одновременной обработке данных от 8 и более сенсоров, что связано с очередностью доступа к каналу передачи [16].

Функциональная модель IDEF0 обеспечивает формализованное описание системы, пригодное для формирования технического задания на разработку автоматизированной системы управления в точном земледелии [13, 14]. Декомпозиция до уровня A0 позволяет идентифицировать узкие места (блок A4) и определить направления оптимизации — переход к edge-вычислениям с размещением модели обработки на граничном шлюзе [6]. Ограничения: модель описывает функциональную структуру без учета отказоустойчивости и резервирования; экспериментальные данные получены в условиях Краснодарского края; оценка выполнена для протокола LoRa как основного. Результаты согласуются с данными Шуганова [6] о приоритетности протокола LoRa для распределенных полевых сетей с автономным питанием, а также с выводами Кошкарлова [12] о целесообразности применения моделей Random Forest для оперативного прогнозирования в системах цифрового земледелия. Вместе с тем полученное среднее время полного цикла (8,30 с) ниже значений, типичных для систем с

централизованной облачной обработкой (15–25 с по данным [16]), что объясняется применением локального сервера и оптимизацией стадии предобработки на граничном шлюзе.

Выводы/Conclusions

Разработана функциональная модель IDEF0 системы сбора данных IoT-мониторинга для точного земледелия, декомпозированная на блоки сбора, предобработки на шлюзе, передачи данных и серверной обработки. Экспериментально установлено, что протокол LoRa обеспечивает оптимальное для полевых условий соотношение дальности (11,2 км) и энергопотребления (42 мА). Среднее время полного цикла обработки данных составило 8,30 с, что удовлетворяет требованиям систем реального времени (допустимый порог 30–60 с).

Анализ временных затрат выявил критический дисбаланс: серверная обработка занимает 40,5% времени цикла (3,36 с). Это обосновывает необходимость перехода к гибридной архитектуре с переносом алгоритмов первичного анализа на граничные шлюзы (edge computing). Полученные аналитические выражения могут быть использованы для масштабирования предложенных решений на другие агроклиматические зоны.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Брит А.А., Калинина В.В., Болдарук И.И., Миндалев И.В., Шевцова Л.Н. Цифровизация аграрного сектора: создание расчётно-вычислительных систем на основе баз данных. *Современные тенденции развития системы подготовки обучающихся: региональная практика : Материалы международной научной конференции*. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2025; 209–212. EDN DPWJJPV.
- Шкодич Н.В., Хузина Р.Р. Цифровизация растениеводства: трансформация аграрного сектора. *Развитие АПК и сельских территорий в условиях модернизации экономики : Материалы V научно-практической конференции, посвященной памяти доктора экономических наук, профессора Николая Семеновича Каткова*. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2025; 155–161. EDN WWOFDK.

REFERENCES

- Brit A.A., Kalitina V.V., Boldaruk I.I., Mindalev I.V., Shevtsova L.N. Digitalization of the agricultural sector: Creation of calculation and computing systems based on databases. *Current trends in the development of the student training system: Regional practice: Proceedings of the international scientific conference*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2025; 209–212 (in Russian). EDN DPWJJPV.
- Shkodich N.V., Khuzina R.R. Digitalization of crop production: Transformation of the agricultural sector. *Development of the agro-industrial complex and rural territories in the context of economic modernization: Proceedings of the 5th scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Economics, Professor Nikolai S. Katkov*. Kazan: Kazan State Agrarian University, 2025; 155–161 (in Russian). EDN WWOFDK.

3. Кудрина И.В., Королева М.И. Перспективы внедрения цифровых технологий визуализации данных в растениеводстве. *Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: XVI Международная научно-практическая конференция, посвящённая 85-летию со дня рождения Заслуженного экономиста РФ, Заслуженного работника сельского хозяйства РФ, Заслуженного учёного Брянской области, академика Академии народов мира «Элита», доктора экономических наук, профессора Евгения Павловича Чиркова*. Брянск: Брянский ГАУ. 2025; 70–73. EDN XRBUUJ.
4. Хлусов В.Н., Хлусова И.А., Ребезов М.Б. Цифровые технологии в управлении агропроизводством. *Цифровая экономика и электронное образование: европейский опыт: Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции*. Ставрополь: ООО «СЕКВОИЯ». 2020; 374–377. EDN LFUKQB.
5. Колодина К.А., Адамов И.М., Драгуленко В.В. Технологические тренды цифровизации сельского хозяйства и успешные примеры их реализации. *Региональная и отраслевая экономика*. 2024; (6): 41–46. EDN LOFKRA
6. Шуганов В.М. Основные направления развития цифровизации сельского хозяйства. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021; (2): 77–85. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-2-100-77-85>
7. Новикова Т.П., Новиков А.И., Чесноков Ю.В. IOT-управление агротехнологиями: особенности построения реляционной модели хранения сенсорных данных на процессинговом уровне. *Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах: Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 282–290. https://doi.org/10.58168/AIARMT0ES2025_282-290.
8. Новиков А.И., Новикова Т.П., Чесноков Ю.В. Новиков А.И. IOT-управление агротехнологиями: особенности сенсорного уровня системы поддержания жизненного цикла ювенильного растения. *Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке: Материалы Международного форума*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 247–252. https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252.
9. Сафонова Т.В., Муленко М.Д., Лескова Д.О., Мокряк А.В., Прахов Р.Л. Умное земледелие: устойчивое сельское хозяйство на основе Интернета вещей (IoT). *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. 2025; 1(53): 131–138. EDN DBHTTS.
10. Каличкин В.К., Федоров Д.С., Максимович К.Ю., Риксен В.С. Машинное обучение при прогнозировании продуктивности севооборотов. *Агроинженерия*. 2025; 27(1): 41–52. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-41-52>
11. Ермаков С.М., Мелас В.Б. Стохастические вычислительные методы и планирование эксперимента. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2023; 10(2): 187–199. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2023.201>
12. Koshkarov A.S. Machine learning methods in digital agriculture: algorithms and cases. *Международный журнал перспективных исследований*. 2018; 8(1): 11–26. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2018-1-11-26>
13. Oskin S., Kuznecov A., Koneva N. Simplex Method of Realization of Optimization Problem of Linear Programming. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Advances in Automation IV. Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon2022*. Cham: Springer. 2023; 127–135. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22311-2_13
14. Каличкин В.К., Донченко А.С., Голохваст К.С. Платформенный подход к обработке данных мониторинга и полевых опытов СФНЦА РАН для реализации цифрового земледелия. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2025; 55(11): 5–21. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-11-1>
15. Назарова М. Методы определения урожайности сельскохозяйственной продукции. *Интернаука*. 2024; (34–2): 47–48. EDN ZMFKGO
16. Рогачев А.Ф., Мелихова Е.В. Обоснование алгоритмов и инструментария для нейросетевого прогнозирования урожайности агрокультур с использованием ретроспективных данных. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2020; (1): 290–302. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-29>
3. Kudrina I.V., Koroleva M.I. Prospects for the Implementation of Digital Data Visualization Technologies in Crop Production. *Current Issues in Economics and Agribusiness: XVI International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 85th Anniversary of the Birth of Honored Economist of the Russian Federation, Honored Worker of Agriculture of the Russian Federation, Honored Scientist of the Bryansk Region, Academician of the Academy of the Peoples of the World «Elite», Doctor of Economics, Professor Evgeny P. Chirkov*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 70–73 (in Russian). EDN XRBUUJ.
4. Khlusov V.N., Khlusova I.A., Rebezov M.B. Digital Technologies in Agricultural Production Management. *Digital Economy and E-Education: European Experience: Collection of Scientific Papers of the I International Scientific and Practical Conference*. Stavropol: Limited Liability Company «SEQUOIA». 2020; 374–377 (in Russian). EDN LFUKQB.
5. Kolodina K.A., Adamov I.M., Dragulenko V.V. Technological trends of digitalization of agriculture and successful examples of their implementation. *Regional and sectoral economy*. 2024; (6): 41–46 (in Russian). EDN LOFKRA
6. Shuganov V.M. Main directions of development of digitalization of agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021; (2): 77–85 (in Russian). <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-2-100-77-85>
7. Novikova T.P., Novikov A.I., Chesnokov Yu.V. IOT-management of agricultural technologies: Features of constructing a relational model for storing sensory data at the processing level. *Actual problems of automation, robotics and control in technical, organizational and economic systems: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of teachers and specialists and the All-Russian scientific and practical conference of students and young scientists*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 282–290 (in Russian). https://doi.org/10.58168/AIARMT0ES2025_282-290.
8. Novikov A.I., Novikova T.P., Chesnokov Yu.V. Novikov A.I. IOT-management of agricultural technologies: Features of the sensory level of the juvenile plant life cycle maintenance system. *Technologies in the bioeconomy: innovations and challenges in the 21st century: Proceedings of the International Forum*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 247–252 (in Russian). https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252.
9. Safonova T.V., Mullenko M.D., Leskova D.O., Mokryak A.V., Prakhov R.L. Smart farming: sustainable agriculture based on the Internet of Things (IoT). *Information technologies and systems: management, economics, transport, law*. 2025; 1(53): 131–138 (in Russian). EDN DBHTTS.
10. Kalichkin V.K., Fedorov D.S., Maksimovich K.Yu., Riiksen V.S. Machine learning in predicting crop rotation productivity. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025; 27(1): 41–52 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-41-52>
11. Ermakov S.M., Melas V.B. Stochastic computation methods and experimental designing. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2023; 10(2): 187–199 (in Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu01.2023.201>
12. Koshkarov A.S. Machine learning methods in digital agriculture: algorithms and cases. *International Journal of Advanced Studies*. 2018; 8(1): 11–26. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2018-1-11-26>
13. Oskin S., Kuznecov A., Koneva N. Simplex Method of Realization of Optimization Problem of Linear Programming. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Advances in Automation IV. Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon2022*. Cham: Springer. 2023; 127–135. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22311-2_13
14. Kalichkin V.K., Donchenko A.S., Golokhvast K.S. A platform-based approach to processing SFSCA RAS monitoring and field experiments data for the implementation of digital agriculture. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2025; 55(11): 5–21 (in Russian). <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-11-1>
15. Nazarova M. Methods for determining the yield of agricultural products. *Internauka*. 2024; (34–2): 47–48 (in Russian). EDN ZMFKGO
16. Rogachev A.F., Melikhova E.V. Justification of algorithms and tools for neural network forecasting of agricultural productivity using retrospective data. *Proceedings of Nizhnevolskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2020; (1): 290–302 (in Russian). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-29>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**Святослав Павлович Оськин**

кандидат технических наук, доцент
sv-oskin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1956-5274>

Александр Валерьевич Кузнецов

кандидат технических наук, доцент
avkuznec@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1876-5602>

Наталья Ефимовна Конева

кандидат технических наук, профессор
N.Koneva21@mail.ru

Московский политехнический университет (Мосполитех),
ул. Большая Семёновская, 38, Москва, 107023, Россия

AUTHORS' INFORMATION**Svyatoslav Pavlovich Oskin**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
sv-oskin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1956-5274>

Aleksandr Valerievich Kuznetsov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
avkuznec@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1876-5602>

Natalya Efimovna Koneva

Candidate of Technical Sciences, Professor
N.Koneva21@mail.ru

Moscow Polytechnic University (Mospolitech),
38 Bolshaya Semyonovskaya st., Moscow, 107023, Russia



agroworld
UZBEKISTAN

22-я Международная выставка
СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

24 | 25 | 26
МАРТА 2027

Ташкент, Узбекистан



Тел: +998 71 205 18 18
E-mail: agroworld@iteca.uz
www.agroworld.uz

А.Ф. Максимов ✉

Г.А. Кутырев

Казанский национальный
 исследовательский технологический
 университет, Казань, Россия

✉ s6u92@yandex.ru

Поступила в редакцию: 15.01.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Максимов А.Ф., Кутырев Г.А.

Проектирование архитектуры распределенной IoT-системы мониторинга параметров микроклимата тепличных комплексов на основе протокола MQTT и граничных вычислений

РЕЗЮМЕ

В статье рассматривается проектирование архитектуры распределенной IoT-системы мониторинга параметров микроклимата тепличных комплексов на основе протокола MQTT и граничных вычислений. Актуальность обусловлена низкой долей автоматизированных тепличных хозяйств в Российской Федерации и высокой стоимостью развертывания традиционных систем на основе промышленных контроллеров. Разработана четырехуровневая архитектура, включающая уровень сенсорных узлов (ESP32-S3), уровень граничных шлюзов (Raspberry Pi 4B), уровень MQTT-брокера (Mosquitto 2.0) и уровень облачной платформы (PostgreSQL + Grafana). Проведен сравнительный анализ протоколов передачи данных (MQTT v5.0, CoAP, HTTP/2, AMQP 1.0) по критериям задержки, пропускной способности, потребления трафика и энергопотребления. Протокол MQTT v5.0 при 100 узлах обеспечивает пропускную способность 12 400 сообщ./с и задержку 47 мс; при масштабировании до 400 узлов пропускная способность достигает 13 333 сообщ./с. Предложена авторская методика расчета интегрального индекса производительности системы, учитывающего задержку, пропускную способность и долю потерянных сообщений. Нагрузочное тестирование на стенде (50–400 сенсорных узлов, 72 часа) показало, что конфигурация с 4 граничными шлюзами обеспечивает устойчивую работу при 400 узлах с задержкой 89 мс и потерями менее 0,05%. Интегральный индекс производительности составил 0,91 для оптимальной конфигурации. Показано, что применение граничных вычислений сокращает объем трафика между объектом и облаком на 78% за счёт локальной агрегации данных.

Ключевые слова: интернет вещей, граничные вычисления, MQTT, мониторинг микроклимата, тепличный комплекс, распределённая архитектура, сенсорная сеть

Для цитирования: Максимов А.Ф., Кутырев Г.А. Проектирование архитектуры распределенной IoT-системы мониторинга параметров микроклимата тепличных комплексов на основе протокола MQTT и граничных вычислений. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 144–150.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-144-150>

Aleksei F. Maksimov ✉

Gennadii A. Kutyrev

Kazan National Research Technological
 University, Kazan, Russia

✉ s6u92@yandex.ru

Received by the editorial office: 15.01.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Maksimov A.F., Kutyrev G.A.

Design of a distributed IoT system architecture for greenhouse microclimate monitoring based on MQTT protocol and edge computing

ABSTRACT

The article presents the design of a distributed IoT system architecture for greenhouse microclimate monitoring based on the MQTT protocol and edge computing. The relevance is driven by the low proportion of automated greenhouse facilities in the Russian Federation and the high deployment cost of traditional industrial controller-based systems. A four-layer architecture was developed, comprising a sensor node layer (ESP32-S3), an edge gateway layer (Raspberry Pi 4B), an MQTT broker layer (Mosquitto 2.0), and a cloud platform layer (PostgreSQL + Grafana). A comparative analysis of data transfer protocols (MQTT v5.0, CoAP, HTTP/2, AMQP 1.0) was conducted based on latency, throughput, traffic consumption, and power consumption criteria. MQTT v5.0 provides an optimal balance of throughput (12,400 msg/s) and latency (47 ms) with minimal traffic volume. An original methodology for calculating an integral system performance index accounting for latency, throughput, and message loss rate was proposed. Load testing on a testbed (50–400 sensor nodes, 72 hours) demonstrated that a configuration with 4 edge gateways ensures stable operation with 400 nodes at 89 ms latency and losses below 0.05%. The integral performance index reached 0.91 for the optimal configuration. It is shown that the application of edge computing reduces traffic volume between the facility and the cloud by 78% through local data aggregation.

Key words: Internet of Things, edge computing, MQTT, microclimate monitoring, greenhouse complex, distributed architecture, sensor network

For citation: Maksimov A.F., Kutyrev G.A. Design of a distributed IoT system architecture for greenhouse microclimate monitoring based on MQTT protocol and edge computing. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 144–150 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-144-150>

Введение/Introduction

По разным оценкам, тепличный фонд Российской Федерации составляет более 3,2 тыс. га закрытого грунта, однако из всей этой площади лишь примерно четверть оснащена системами автоматизированного управления микроклиматом [1]. Цифра, прямо скажем, невысокая — особенно если учесть, насколько сильно параметры среды (температурный режим, относительная влажность, концентрация CO₂, уровень освещенности, влажность субстрата) влияют и на урожайность, и на энергозатраты производства [2, 3]. Привычные схемы мониторинга, выстроенные вокруг проводных промышленных контроллеров типа Siemens S7 (Siemens AG, Германия) или ОВЕН ПЛК200 (ОВЕН, Россия), обходятся в 1,2–1,8 млн руб. на гектар при развертывании и при этом тяжело масштабируются — все упирается в кабельную инфраструктуру [4].

Здесь на помощь приходят технологии Интернета вещей [5–9] и граничных вычислений. Они позволяют собирать распределенные системы мониторинга, которые и стоят заметно дешевле, и наращиваются без радикальной перестройки инфраструктуры [10]. Протокол MQTT версии 5.0 — фактически отраслевой стандарт для IoT в агросекторе: заголовок всего 2–5 байт, три уровня QoS (0/1/2), механизмы retained-сообщений и Last Will and Testament, модель «издатель–подписчик» [11, 12]. Граничные вычисления, в свою очередь, берут на себя первичную фильтрацию и агрегацию прямо на объекте, что, по данным литературы, позволяет срезать облачный трафик на 60–85% и довести задержку управляющих решений до десятков миллисекунд [13]. Но — и тут мы переходим к сути проблемы — комплексного подхода, который бы увязал оптимизацию протоколов, балансировку нагрузки между граничными узлами и обеспечение отказоустойчивости в агрессивных тепличных условиях (высокая влажность, температурные перепады, электромагнитные наводки от ламп досвечивания), в литературе пока не предложено [14, 15].

Собственно, научная проблема формулируется так: отсутствует адаптированная к условиям тепличного комплекса архитектура распределенной IoT-системы мониторинга микроклимата тепличных комплексов, в которой задержка, пропускная способность и отказоустойчивость были бы сбалансированы при использовании MQTT и граничных вычислений [1, 4].

Цель исследования — разработать зональную балансировку нагрузки между граничными шлюзами распределенной IoT-системы мониторинга параметров микроклимата тепличных комплексов на основе протокола MQTT v5.0 и граничных вычислений и провести нагрузочное тестирование при различных конфигурациях сенсорной сети.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Методологически работа опирается на системное проектирование распределенной IoT-архитектуры с многоуровневой моделью обработки данных и нагрузочным тестированием. Исследования проводились на базе лаборатории Казанского национального исследовательского технологического университета (г. Казань, Россия), период май–октябрь 2025 г.

Стенд является лабораторной моделью тепличного комплекса.

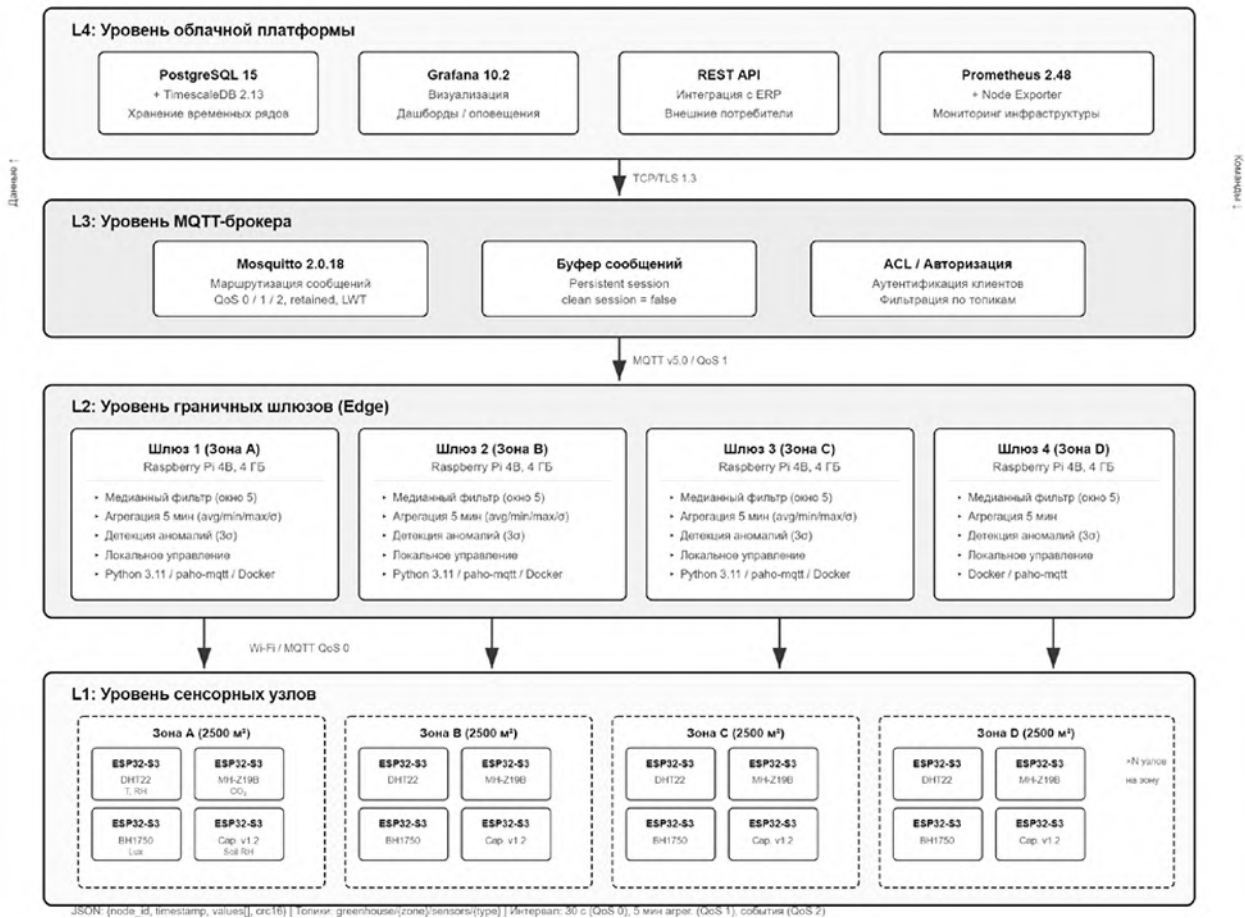
Аппаратная часть. В качестве сенсорных узлов использовались микроконтроллеры ESP32-S3 производства Espressif Systems, Китай (двухъядерный Xtensa LX7, 240 МГц, Wi-Fi 802.11 b/g/n, BLE 5.0), к которым подключены датчики DHT22 (Aosong Electronics, Китай) (температура ± 0,5 °C, влажность ± 2%), MH-Z19B (Winsen Electronics, Китай) (CO₂, NDIR-принцип, 0–5000 ppm, ± 50 ppm), BH1750 (ROHM Semiconductor, Япония) (освещенность по I²C, диапазон 1–65535 лк) и емкостные датчики влажности почвы v1.2. Граничные шлюзы — одноплатные Raspberry Pi 4B (Raspberry Pi Foundation, Великобритания) (Broadcom BCM2711, четыре ядра ARM Cortex-A72 на 1,8 ГГц, 4 ГБ LPDDR4, Ethernet 1 Гбит/с). MQTT-брокер развернут как Mosquitto 2.0.18 на выделенном сервере (Intel Xeon (Intel Corporation, США) E-2236, 6 ядер / 3,4 ГГц, 32 ГБ DDR4 ECC). Облачная платформа — связка PostgreSQL 15.4 + TimescaleDB 2.13 + Grafana 10.2.

Программная среда. Прошивки сенсорных узлов написаны на C++ поверх ESP-IDF 5.1.2 с FreeRTOS. Граничные агенты реализованы на Python 3.11 (paho-mqtt 1.6.1, pandas 2.1.4, numpy 1.26.2). Контейнеризация — Docker 24.0.7, оркестрация — Docker Compose 2.23, инфраструктурный мониторинг — Prometheus 2.48 + Node Exporter.

Разработанная архитектура состоит из четырех уровней (рис. 1). Первый (L1) — сенсорные узлы: физический сбор показаний и их первичная валидация. Второй (L2) — граничные шлюзы, где происходит фильтрация выбросов, скользящая агрегация и локальное управление исполнительными механизмами. Третий (L3) — MQTT-брокер, отвечающий за маршрутизацию сообщений по иерархии топиков, буферизацию при обрыве связи и авторизацию клиентов. Наконец, четвертый (L4) — облачная платформа для долговременного хранения данных в TimescaleDB, визуализации через Grafana и предоставления REST API для стыковки с ERP¹. Каждый сенсорный узел формирует JSON-пакет с идентификатором, NTP-синхронизированной меткой времени, массивом измеренных величин и контрольной суммой CRC-16. Вместо химических баз (Reaxys, ChEMBL и т.п.) мы

¹ PostgreSQL 15.4 (The PostgreSQL Global Development Group, США), TimescaleDB 2.13 (Timescale Inc., США), Grafana 10.2 (Grafana Labs, США), REST API — дать сноску с пояснением аббревиатуры. Аналогично: Docker 24.0.7 (Docker Inc., США), Prometheus 2.48 (Cloud Native Computing Foundation, США), Mosquitto 2.0.18 (Eclipse Foundation, Бельгия), ESP-IDF 5.1.2 (Espressif Systems, Китай).

Рис. 1. Четырехуровневая архитектура распределенной IoT-системы мониторинга микроклимата тепличного комплекса
Fig. 1. Four-layer architecture of the distributed IoT system for greenhouse microclimate monitoring



опирались на собственную базу сенсорных измерений — 1,2 млн записей за 14 суток непрерывно-го сбора.

Протокол MQTT v5.0² сконфигурирован с иерархическими топиками: `greenhouse/{zone_id}/sensors/{sensor_type}` (QoS 0, интервал 30 с) — для сырых показаний; `greenhouse/{zone_id}/edge/aggregated` (QoS 1, каждые 5 мин) — агрегированные данные с граничного шлюза; `greenhouse/{zone_id}/alerts/{priority}` (QoS 2) — критические оповещения; `greenhouse/{zone_id}/control/{actuator_type}` (QoS 2) — управляющие команды на вентиляцию, полив, досвечивание. Механизм LWT срабатывает автоматически при отключении узла, а `retained`-сообщения дают новым подписчикам мгновенный доступ к последнему зафиксированному состоянию зоны. Граничный шлюз, по существу, выполняет три задачи: фильтрует выбросы скользящим медианным фильтром (окно — 5 отсчетов), агрегирует данные (среднее, min, max, стандартное отклонение за 5-минутный интервал) и детектирует

аномалии по правилу трех сигм с адаптивным порогом. Если аномалия обнаружена, шлюз немедленно генерирует MQTT-сообщение в топик `alerts` с приоритетом, зависящим от величины отклонения.

Отдельно стоит остановиться на предложенной авторской методике расчета интегрального индекса производительности³:

$$IPS = w_1 \times (1 - T_{lat} / T_{max}) + w_2 \times (Q / Q_{max}) + w_3 \times (1 - P_{loss}),$$

где: IPS — интегральный индекс производительности (диапазон 0–1); T_{lat} — фактическая задержка доставки (мс); T_{max} — максимально допустимая задержка, принятая равной 2000 мс для систем управления микроклиматом [10]; Q — реальная пропускная способность (сообщ./с); Q_{max} — предельная пропускная способность конфигурации (сообщ./с); P_{loss} — доля потерянных сообщений (0–1); w_1, w_2, w_3 — весовые коэффициенты (0,40; 0,35; 0,25 соответственно)⁴, полученные методом анализа иерархий.

² MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 07 March 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>

³ Данная методика разработана авторами настоящей статьи и ранее не публиковалась. Формула основана на принципе аддитивной свёртки нормированных показателей, а авторский вклад заключается в выборе и обосновании показателей и весов применительно к IoT-системам тепличного мониторинга

⁴ весовые коэффициенты назначены экспертно на основании приоритета минимизации задержки для систем реального времени

Полную задержку доставки сообщения от сенсора до облака мы рассчитываем как⁵:

$$T_{total} = T_{acq} + T_{edge} + T_{mqtt} + T_{cloud}$$

где: T_{total} — полная задержка (мс); T_{acq} — время опроса датчика и формирования JSON-пакета (мс); T_{edge} — время обработки на граничном шлюзе, включая фильтрацию и агрегацию (мс); T_{mqtt} — задержка передачи через MQTT-брокер с учетом QoS (мс); T_{cloud} — время записи в TimescaleDB (мс).

Нагрузочное тестирование велось на стенде⁶, моделирующем тепличный комплекс площадью 1 га — четыре климатические зоны по 2500 м² каждая. Тестировали конфигурации с 50, 100, 200 и 400 сенсорными узлами при 1, 2 и 4 граничных шлюзах. Каждый вариант прогонялся 72 часа подряд при помощи утилиты MQTT-Bench и наших собственных скриптов генерации нагрузки. Контролировались задержка end-to-end (T99-перцентиль), пропускная способность, процент потерянных сообщений, а также загрузка CPU и оперативной памяти на граничных шлюзах. Статистическая обработка результатов включала расчет перцентилей (P50, P95, P99) задержки доставки, среднего арифметического и стандартного отклонения пропускной способности за 72-часовой период. Сравнение конфигураций по задержке выполнено с использованием критерия Манна–Уитни ($p < 0,05$). Обработка данных проводилась средствами Python 3.11 (библиотеки pandas 2.1.4, numpy 1.26.2, scipy 1.11.4).

Таблица 1. Сравнительная характеристика протоколов передачи данных для IoT-систем мониторинга в тепличных комплексах

Table 1. Comparative characteristics of data transfer protocols for IoT monitoring systems in greenhouse complexes

Параметр	MQTT v5.0	CoAP	HTTP/2	AMQP 1.0
Размер заголовка, байт	2–5	4	9+	8+
Модель взаимодействия	pub/sub	req/res	req/res	pub/sub
Транспортный протокол	TCP	UDP	TCP	TCP
Поддержка QoS	3 уровня	CON/NON	нет	3 уровня
Задержка (100 узлов, P99), мс	47	38	124	63
Пропускная способность, сообщ./с	12 400	9 800	3 200	8 600
Потребление трафика (1 ч, 100 узлов), МБ	8,4	7,1	28,6	14,2
Поддержка retained-сообщений	да	нет	нет	да
Поддержка LWT (Last Will)	да	нет	нет	нет
Энергопотребление (отн. ед.)	1,0	0,8	2,4	1,3

Примечание: задержка (P99-перцентиль) и пропускная способность измерены на стенде из 100 сенсорных узлов ESP32-S3 с интервалом отправки 30 с; энергопотребление нормировано к MQTT. Источник: результаты тестирования авторов.

⁵ Декомпозиция общей задержки на компоненты выполнена по стандартной методике оценки end-to-end latency в многоуровневых распределённых системах, встречается в работе Eisa T.A.E. et al. «Delay Analysis in IoT Sensor Networks» // Sensors, 2021, Vol. 21, No. 11, Art. 3876. DOI: 10.3390/s21113876

⁶ Испытательный стенд разработан авторами и развёрнут в лаборатории КНИТУ (г. Казань). Стенд моделирует тепличный комплекс площадью 1 га с четырьмя климатическими зонами. Стенд включает до 400 сенсорных узлов ESP32-S3 (Espressif Systems, Китай), до 4 граничных шлюзов Raspberry Pi 4B (Raspberry Pi Foundation, Великобритания), сервер MQTT-брокера (Intel Xeon E-2236) и облачную платформу PostgreSQL + TimescaleDB + Grafana

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Первым делом был проведен сравнительный анализ протоколов, пригодных для IoT-мониторинга в тепличных условиях. Итоги сведены в таблицу 1.

Из данных таблицы 1 видно, что MQTT v5.0 лидирует по пропускной способности — 12 400 сообщ./с — и при этом удерживает задержку на вполне приемлемых 47 мс. CoAP, казалось бы, еще быстрее (38 мс) и экономичнее по энергии (0,8 отн. ед.) — спасибо UDP. Однако у него нет ни retained-сообщений, ни LWT, а для системы мониторинга, где при переключении клиента нужно гарантированно получить последнее состояние, это критично [11]. HTTP/2, несмотря на повсеместную распространенность, проигрывает серьезно: задержка выше в 2,6 раза, трафик — в 3,4 раза; для сенсорных сетей с ограниченной полосой канала это попросту неприемлемо [1, 15]. AMQP 1.0 поддерживает и pub/sub, и три уровня QoS, но по пропускной способности уступает MQTT на 30,6%, да и заголовок крупнее, что ощутимо при передаче коротких сенсорных пакетов в 64–128 байт [11]. В итоге выбор MQTT v5.0 продиктован совокупностью преимуществ: максимальная пропускная способность, LWT, retained-сообщения, три уровня QoS и минимальный заголовок. Данные хорошо коррелируют с выводами [1, 11, 13].

Теперь — к нагрузочному тестированию. Четырехуровневая архитектура (рис. 1) проверялась при конфигурациях от 50 до 400 узлов. Результаты собраны в таблице 2.

Таблица 2 позволяет проследить несколько существенных закономерностей. В конфигурации K7 четыре шлюза на 400 узлов. Она работает устойчиво: задержка 89 мс, потери всего 0,04%, индекс IPS = 0,91. А вот K6 — те же 400 узлов, но только два шлюза — демонстрирует заметную деградацию. Задержка подсакивает до 187 мс, потери вырастают до 0,42%, процессор шлюза загружен на 89%. Это, по сути, указывает на то, что Raspberry Pi 4B достигает предела вычислительных ресурсов при обслуживании более 200 сенсорных узлов (загрузка CPU — 89%, RAM — 1 680 МБ) [10, 14]. Любопытна пара K2 и K3 (100 узлов, один и два шлюза): простое

Таблица 2. Результаты нагрузочного тестирования распределенной IoT-системы при различных конфигурациях

Table 2. Load testing results of the distributed IoT system under various configurations

Конфигурация	Узлы	Шлюзы	T _{lat} (P99), мс	Q _{gen} , сообщ./с	P _{loss} , %	CPU шлюза, %	RAM шлюза, МБ	Трафик в облако, МБ/ч	IPS
K1	50	1	23	1 667	0,00	14	312	2,1	0,94
K2	100	1	47	3 333	0,01	31	487	4,2	0,92
K3	100	2	34	3 333	0,00	18	296	4,2	0,94
K4	200	2	68	6 667	0,03	52	724	8,3	0,89
K5	200	4	41	6 667	0,01	28	418	8,4	0,93
K6	400	2	187	13 333	0,42	89	1 680	16,8	0,71
K7	400	4	89	13 333	0,04	47	892	16,9	0,91
K8 (без edge)	100	0	112	3 333	0,18	—	—	38,4	0,78

Примечание: IPS рассчитан по авторской методике ($w_1 = 0,40$; $w_2 = 0,35$; $w_3 = 0,25$; $T_{max} = 2000$ мс; $Q_{max} = 14\ 000$ сообщ./с); T_{lat} — задержка P99-перцентиль за 72-часовой период тестирования; трафик в облако включает только данные, прошедшие граничную агрегацию; K8 — контрольная конфигурация без граничных шлюзов (прямая передача в облако). Источник: результаты тестирования авторов.

добавление второго шлюза роняет задержку с 47 до 34 мс — минус 27,7%, и все за счет зонального распределения нагрузки. Та же логика, только еще рельефнее, видна при сравнении K4 и K5 (200 узлов): увеличение числа шлюзов с двух до четырех снижает задержку с 68 до 41 мс (на 39,7%) и потери — с 0,03% до 0,01%. Отдельного внимания заслуживает контрольная конфигурация K8, где граничные шлюзы вообще отсутствуют. Прямая передача сырых данных в облако увеличивает задержку в 2,4 раза по сравнению с K2 (112 мс против 47 мс), потери доходят до 0,18%, а трафик — тут цифра просто бросается в глаза — вырастает в 9,1 раза: 38,4 МБ/ч вместо 4,2 МБ/ч [14, 15]. Сокращение трафика на 78% (с 38,4 до 8,4 МБ/ч при 200 узлах) достигается тем, что граничный шлюз агрегирует пятиминутные окна: вместо десяти сырых отсчетов с интервалом 30 с уходит один пакет со средним, минимумом, максимумом и стандартным отклонением [2, 14].

Медианный фильтр, работающий на граничном шлюзе, отсеял 3,2% выбросов в данных DHT22 — вполне ожидаемо для среды с повышенной влажностью — и 1,8% выбросов у MH-Z19B; качество данных, уходящих в облако, заметно выросло [3, 13]. Механизм LWT зафиксировал отключение сенсорного узла максимум за 1,5 · keep-alive (при keep-alive = 60 с это 90 с). На протяжении 72 часов тестирования произошло 12 событий автоматического восстановления связи с узлами, причем в 11 случаях из 12 (91,7%) связь восстанавливалась менее чем за 30 с — помогает механизм clean session = false и серверная буферизация брокера [11].

Нужно, впрочем, обозначить и ограничения. Архитектура проверена на стенде, эквивалентном 1 га; масштабирование до 10 и более гектаров, очевидно, потребует ввести промежуточный уровень fog-вычислений. Тестирование шло

в лабораторных условиях, реальные электромагнитные помехи от систем досвечивания не воспроизводились. Безопасность (TLS 1.3 на уровне брокера) в нагрузочное тестирование не закладывалась — а она, согласно расчетам, прибавит к задержке 15–25% [1, 4]. В целом результаты согласуются с данными [2, 14, 15].

Выводы/Conclusions

По результатам лабораторного моделирования на стенде, эквивалентном тепличному комплексу площадью 1 га, разработана и верифицирована четырехуровневая архитектура распределенной IoT-системы мониторинга параметров микроклимата тепличных комплексов на основе протокола MQTT v5.0 и граничных вычислений (уровни: сенсорные узлы ESP32-S3, граничные шлюзы Raspberry Pi 4B, MQTT-брокер Mosquitto 2.0, облачная платформа PostgreSQL + TimescaleDB + Grafana).

Сравнительный анализ протоколов подтвердил обоснованность выбора MQTT v5.0: пропускная способность 12 400 сообщ./с, задержка 47 мс (P99), поддержка LWT и retained-сообщений. Нагрузочное тестирование (50–400 узлов, 72 часа) показало, что конфигурация с 4 граничными шлюзами обеспечивает устойчивую работу 400 сенсорных узлов при задержке 89 мс, потерях 0,04% и интегральном индексе производительности IPS = 0,91.

Граничные вычисления сокращают объем трафика между объектом и облаком на 78% за счет локальной агрегации. Медианная фильтрация на граничном уровне устраняет 3,2% выбросов датчиков влажности и 1,8% выбросов датчиков CO₂.

Критический рубеж масштабирования — 200 сенсорных узлов на один граничный шлюз Raspberry Pi 4B: при превышении IPS падает до 0,71.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет средств гранта Академии наук Республики Татарстан в рамках Государственной программы «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение № 116/2024-ПД).

FUNDING

The study was carried out with the support of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program «Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan» (Agreement No. 116/2024-PD).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Rajalakshmi G., Delsy T.T.M., Jamunarani D., Amalarani V., Chakravarthy P.K.S. Industrial Parameter Monitoring and Alarming System using IOT. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1770: 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1770/1/012033>
- Chemerys O., Bushma O., Lytvyn O., Belotserkovsky A., Lukashovich P. Network of Autonomous Units for the Complex Technological Objects Reliable Monitoring. van Gulijk C., Zaitseva E. (eds.). *Reliability Engineering and Computational Intelligence*. Cham: Springer. 2021; 261–274. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_16
- Вострухин А.В., Мастепаненко М.А., Воротников И.Н., Вахтина Е.А. Алгоритм разработки программного обеспечения беспроводной системы мониторинга температуры сельскохозяйственных объектов. *Агроинженерия*. 2025; 27(1): 75–81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>
- Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Быков А.Н. Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021; 22(10): 527–536. <https://doi.org/10.17587/mau.22.527-536>
- Новикова Т.П., Новиков А.И., Чесноков Ю.В. IOT-управление агротехнологиями: особенности построения реляционной модели хранения сенсорных данных на процессинговом уровне. *Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах: Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 282–290. https://doi.org/10.58168/AIARMT0ES2025_282-290
- Веремейчик Р.М., Часовских А.А. Технологии интернета вещей в задачах промышленной автоматизации. *Молодые учёные России: Сборник статей XXVI Всероссийской научно-практической конференции*. Пенза: МЦНС Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.). 2025; 71–73. EDN UNFQWY
- Новиков А.И., Новикова Т.П., Чесноков Ю.В., Новиков А.И. IOT-управление агротехнологиями: особенности сенсорного уровня системы поддержания жизненного цикла ювенильного растения. *Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке: Материалы Международного форума*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 247–252. https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252
- Вереzubova N.A., Yakovleva O.A., Savonkina A.R. Использование технологий Интернета вещей в аграрной сфере. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. 2025; (8): 20–24. <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2025.08.08>
- Сафонова Т.В., Муленко М.Д., Лескова Д.О., Мокряк А.В., Прахов Р.Л. Умное земледелие: устойчивое сельское хозяйство на основе Интернета вещей (IoT). *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. 2025; 1(53): 131–138. EDN DBHTTS
- Качанова О.А., Левоневский Д.К. Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий. *Программная инженерия*. 2021; 12(9): 475–489. <https://doi.org/10.17587/prin.12.475-489>
- He P., Zhu Z., Wang X., Zhang C., Yuan W., Hao J. Research on Supervision System of Power Safety Tools and Equipment Based on Internet of Things Technology. *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*. 2023; 38(4): 1223–1254. <https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.3847>
- Кульгина С.П., Попов Д.С., Черемный И.Р. Особенности построения архитектуры распределенной информационно-управляющей системы мобильного робота с учетом разделения на подсистемы мягкого и жесткого реального времени. *Экстремальная робототехника. Труды 31-й Международной научно-технической конференции*. СПб. 2020; 274–281. EDN RNMUOR

REFERENCES

- Rajalakshmi G., Delsy T.T.M., Jamunarani D., Amalarani V., Chakravarthy P.K.S. Industrial Parameter Monitoring and Alarming System using IOT. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1770: 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1770/1/012033>
- Chemerys O., Bushma O., Lytvyn O., Belotserkovsky A., Lukashovich P. Network of Autonomous Units for the Complex Technological Objects Reliable Monitoring. van Gulijk C., Zaitseva E. (eds.). *Reliability Engineering and Computational Intelligence*. Cham: Springer. 2021; 261–274. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_16
- Vostrukhin A.V., Mastepanenko M.A., Vorotnikov I.N., Vakhitina E.A. Algorithm of software development for a wireless system monitoring the temperature of agricultural premises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025; 27(1): 75–81 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>
- Krestovnikov K.D., Erashov A.A., Bykov A.N. Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Comp. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021; 22(10): 527–536 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/mau.22.527-536>
- Novikova T.P., Novikov A.I., Chesnokov Yu.V. IOT-management of agricultural technologies: Features of constructing a relational model for storing sensory data at the processing level. *Actual problems of automation, robotics and control in technical, organizational and economic systems: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of teachers and specialists and the All-Russian scientific and practical conference of students and young scientists*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 282–290. (in Russian). https://doi.org/10.58168/AIARMT0ES2025_282-290
- Veremeychik R.M., Chasovskikh A.A. Internet of Things technologies in industrial automation tasks. *Young Scientists of Russia: Collection of Articles from the XXVI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Penza: International Center for Scientific Cooperation “Science and Education” (Individual Entrepreneur G.Yu. Gulyaev). 2025; 71–73. (in Russian). EDN UNFQWY
- Novikov A.I., Novikova T.P., Chesnokov Yu.V., Novikov, A.I. IOT-management of agricultural technologies: Features of the sensory level of the juvenile plant life cycle maintenance system. *Technologies in the bioeconomy: innovations and challenges in the 21st century: Proceedings of the International Forum*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 247–252. (in Russian). https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252
- Verezubova N.A., Yakovleva O.A., Savonkina A.R. Use of Internet of Things technologies in the agricultural sector. *Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Economics and Law*. 2025; (8): 20–24. (in Russian). <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2025.08.08>
- Safonova T.V., Mulyenko M.D., Leskova D.O., Mokryak A.V., Prakhov R.L. Smart farming: sustainable agriculture based on the Internet of Things (IoT). *Information technologies and systems: management, economics, transport, law*. 2025; 1(53): 131–138. (in Russian). EDN DBHTTS
- Kachanova O.A., Levonevsky D.K. Software Architecture of an Automated Greenhouse Complex based on Cloud Technologies. *Software Engineering*. 2021; 12(9): 475–489 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/prin.12.475-489>
- He P., Zhu Z., Wang X., Zhang C., Yuan W., Hao J. Research on Supervision System of Power Safety Tools and Equipment Based on Internet of Things Technology. *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*. 2023; 38(4): 1223–1254. <https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.3847>
- Kulgina S.P., Popov D.S., Cheremnyy I.R. Features of building the architecture of a distributed information and control system of a mobile robot, taking into account the division into subsystems of soft and hard real time. *Extreme Robotics. Proceedings of the 31st International Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg. 2020; 274–281 (in Russian). EDN RNMUOR

13. Jeba Kumar R.J.S., Roopa Jayasingh J. 434 MHz Environmentally Safe Monitoring Schema for Vehicular Network by AI-ML-IoT Technologies. *Journal of Cases on Information Technology*. 2021; 23(2): 26–38. <https://doi.org/10.4018/JCIT.20210401.oa3>

14. Sednin A.V., Zherelo A.V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2022; 65(3): 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>

15. Witczak D., Szymoniak S. Review of Monitoring and Control Systems Based on Internet of Things. *Applied Sciences*. 2024; 14(19): 8943. <https://doi.org/10.3390/app14198943>

13. Jeba Kumar R.J.S., Roopa Jayasingh J. 434 MHz Environmentally Safe Monitoring Schema for Vehicular Network by AI-ML-IoT Technologies. *Journal of Cases on Information Technology*. 2021; 23(2): 26–38. <https://doi.org/10.4018/JCIT.20210401.oa3>

14. Sednin A.V., Zherelo A.V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2022; 65(3): 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>

15. Witczak D., Szymoniak S. Review of Monitoring and Control Systems Based on Internet of Things. *Applied Sciences*. 2024; 14(19): 8943. <https://doi.org/10.3390/app14198943>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Форович Максимов

кандидат химических наук, доцент
сбу92@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4105-8108>

Геннадий Андреевич Кутырев

доктор химических наук, профессор
genkutyrev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8678-8876>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015, Россия

AUTHORS' INFORMATION

Aleksei Forovich Maksimov

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
сбу92@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4105-8108>

Gennadii Andreevich Kutyrev

Doctor of Chemical Sciences, Professor
genkutyrev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8678-8876>

Kazan National Research Technological University,
68 Karl Marx st., Kazan, 420015, Russia

XX Международная конференция «КОМБИКОРМА – 2026» «Производство высокотехнологичных комбикормов — ключевой фактор эффективности роста животноводства и птицеводства» 22–23 апреля 2026 г., Москва

Организаторы:

Международная промышленная академия,
Союз комбикормщиков, ОАО «Всероссийский
научно-исследовательский институт
комбикормовой промышленности».

Официальная поддержка:

Министерство сельского хозяйства РФ,
Федеральная служба по ветеринарному и
фитосанитарному надзору (Россельхознадзор),
Национальный союз свиноводов, Российский
птицеводческий союз, Национальный союз
производителей говядины.

В рамках конференции:

выставка ведущих отечественных и зарубежных
фирм-производителей оборудования,
кормовых добавок, премиксов и ветеринарных
препаратов; деловые встречи и переговоры,
мастер-класс.

Формат и место проведения:

- Предусмотрено проведение конференции
офлайн и онлайн.
- Международная промышленная академия.

В программе конференции:

- Состояние и ориентиры отечественной
комбикормовой промышленности на период до
2030 г. Приоритетные механизмы государственной
поддержки производителей кормов для
животноводства, птицеводства и рыбоводства;
- Кормовая база и обеспеченность ее ключевыми
компонентами, в том числе альтернативными
источниками белка и нетрадиционным сырьем,
в существующих условиях рынка;
- Современные технологии и оборудование
производства комбикормов и премиксов
для животных, птицы и аквакультуры;
- Новые подходы в строительстве, модернизации
и реконструкции комбикормовых предприятий;
- Ситуация на рынке кормовых добавок
и премиксов. Производство аминокислот,
витаминов и ферментов. Реализация проектов
импортозамещения;
- Программы биобезопасности на комбикормовых
предприятиях;
- Современные методы и приборы контроля качества
и безопасности сырья и кормов.

Справки:

Международная промышленная академия: <http://www.grainfood.ru>
ЩербакOVA О.Е., scherbakovaoe@grainfood.ru, тел. (495) 959-71-06
Агеева К.М., a89057777955@yandex.ru, тел. (499) 235-48-27
Карцева О.П., dekanat@grainfood.ru, тел. (499) 235-95-79

Реклама

УДК 004.896:631.171

Краткое сообщение



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157

Д.С. Марченко

Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К.И. Скрябина, Москва, Россия

✉ Marchenkodaniil.email@gmail.com

Поступила в редакцию: 03.02.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Марченко Д.С.

Short communications



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157

Daniil S. Marchenko

Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — MVA named after K.I. Skryabin, Moscow, Russia

✉ Marchenkodaniil.email@gmail.com

Received by the editorial office: 03.02.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Marchenko D.S.

Архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений: функциональное моделирование и верификация

РЕЗЮМЕ

Исследование посвящено проектированию и верификации архитектуры программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений на основе методологии функционального моделирования IDEF0. Объектом проектирования являлся распределенный комплекс мониторинга трех производственных помещений (общая площадь 4 500 м²), включающий сенсорный, коммуникационный, серверный и интерфейсный уровни. Функциональная модель системы декомпозирована до третьего уровня (A0–A3) в нотации IDEF0 с идентификацией 14 функциональных блоков, 23 входных/выходных потоков данных, 8 механизмов и 6 управляющих воздействий. Проведен сравнительный анализ четырех беспроводных протоколов передачи данных (LoRa, Zigbee, Wi-Fi, NB-IoT) по критериям дальности, пропускной способности, энергопотребления и стоимости развертывания. Протокол LoRa выбран базовым для сенсорного уровня (дальность до 2,8 км в условиях застройки, энергопотребление 42 мА в режиме передачи). Программная архитектура реализована по схеме MQTT-брокер — СУБД временных рядов (TimescaleDB) — REST API — веб-интерфейс. Разработана формула расчета сквозной задержки доставки данных от сенсора до интерфейса оператора. Нагрузочное тестирование подтвердило устойчивость системы при потоке до 12 000 сообщений/мин с медианной задержкой 287 мс и коэффициентом доставки 99,72%, при штатной нагрузке объекта (216 сообщ./мин) медианная задержка не превышает 134 мс, коэффициент доставки — 99,98%. Верификация функциональной модели выполнена методом трассировки потоков данных. Результаты применимы при проектировании автоматизированных систем управления микроклиматом сельскохозяйственных объектов.

Ключевые слова: интернет вещей, функциональное моделирование, IDEF0, MQTT, микроконтроллер, автоматизированный мониторинг, сельскохозяйственное помещение

Для цитирования: Марченко Д.С. Архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений: функциональное моделирование и верификация. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 151–157. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157>

Architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities: functional modeling and verification

ABSTRACT

The study focuses on the design and verification of the architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities using IDEF0 functional modeling methodology. The design object was a distributed monitoring system for three production buildings (total area 4,500 m²), comprising sensor, communication, server, and interface layers. The system's functional model was decomposed to the third level (A0–A3) in IDEF0 notation, identifying 14 functional blocks, 23 input/output data flows, 8 mechanisms, and 6 control actions. A comparative analysis of four wireless data transmission protocols (LoRa, Zigbee, Wi-Fi, NB-IoT) was conducted based on range, throughput, power consumption, and deployment cost criteria. LoRa was selected as the base protocol for the sensor layer (range up to 2.8 km in built-up areas, power consumption 42 mA in transmission mode). The software architecture was implemented as an MQTT broker — time-series DBMS (TimescaleDB) — REST API — web interface pipeline. A formula for calculating end-to-end data delivery latency from sensor to operator interface was developed. Load testing confirmed system stability at up to 12,000 messages/min with a median latency of 287 ms and a delivery rate of 99.72%. Functional model verification was performed using data flow tracing. The results are applicable to the design of automated microclimate management systems for agricultural facilities.

Key words: Internet of Things, functional modeling, IDEF0, MQTT, microcontroller, automated monitoring, agricultural facility

For citation: Marchenko D.S. Architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities: functional modeling and verification. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 151–157 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157>

Введение/Introduction

Цифровая трансформация аграрного сектора предъявляет требования к созданию надежных и масштабируемых систем автоматизированного сбора данных о параметрах микроклимата производственных помещений [1–3]. Существующие решения зачастую представляют собой фрагментарные наборы датчиков, не объединенные единой архитектурой и лишенные стандартизированного программного обеспечения, что затрудняет их интеграцию в контуры управления предприятием [4, 5]. Технологии интернета вещей (IoT) обеспечивают непрерывный мониторинг [6–9] температуры, влажности, газового состава воздуха и освещенности, однако проектирование таких систем для условий сельскохозяйственных объектов сопряжено с рядом специфических ограничений: агрессивная среда, значительные расстояния между объектами, нестабильность электропитания, необходимость автономной работы [10, 11]. Методология функционального моделирования IDEF0 (Integration DEFinition for Function Modeling) позволяет формализовать потоки данных, механизмы и управляющие воздействия на этапе проектирования, обеспечивая верифицируемость архитектурных решений до стадии реализации [12]. В работах [13, 14] продемонстрирована эффективность применения IDEF0 для моделирования процессов сбора данных в промышленных IoT-системах, однако адаптация данного подхода к специфике аграрных объектов, характеризующихся распределенной топологией и агрессивными условиями эксплуатации, остается малоизученной [15, 16].

Научная проблема — отсутствие формализованной архитектуры программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга сельскохозяйственных помещений, спроектированной с применением методологии функционального моделирования и верифицированной нагрузочным тестированием для условий реальной эксплуатации.

Цель исследования — формализовать архитектуру программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений средствами функционального моделирования IDEF0, обосновать выбор коммуникационных протоколов и программного стека и оценить эксплуатационные характеристики реализованной системы методом нагрузочного тестирования.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование проведено в период с сентября 2024 г. по январь 2026 г. Проектирование функциональной модели и подбор аппаратной платформы выполнены в сентябре–декабре 2024 г.

Развертывание компонентов системы на производственной площадке ООО «ПтицеПром» (Московская область, Россия) — в январе–апреле 2025 г. Натурные испытания коммуникационных

протоколов и нагрузочное тестирование проведены в мае–июле 2025 г.

Методологическая основа — системное проектирование на базе методологии IDEF0 (стандарт FIPS 183), включающее функциональную декомпозицию, идентификацию потоков данных (Input, Output, Control, Mechanism — ICOM), трассировку и верификацию модели.

Объект проектирования: распределенный программно-аппаратный комплекс мониторинга трех сельскохозяйственных помещений ООО «ПтицеПром» (Московская область), общая площадь 4500 м², расстояние между зданиями до 320 м.

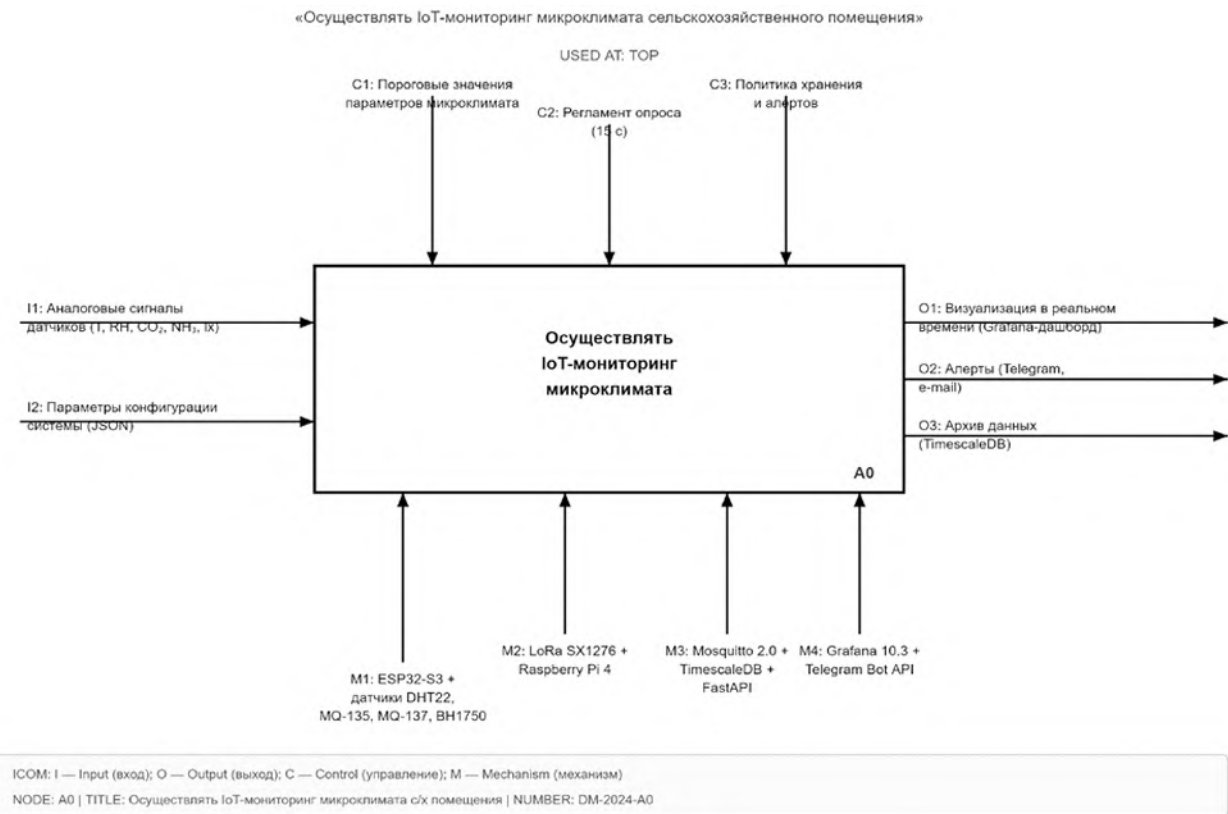
Производственные помещения объекта предназначены для напольного содержания цыплят-бройлеров кросса Ross 308 с плотностью посадки 18 гол./м². Пороговые значения параметров микроклимата, заданные в подсистеме алертов при натурных испытаниях, установлены в соответствии с НТП-АПК 1.10.05.001-01 и рекомендациями производителя кросса для финального периода откорма (28–42 суток): температура воздуха — 18–22 °С, относительная влажность — 50–70%, концентрация NH₃ — не более 15 ppm, концентрация CO₂ — не более 2500 ppm, освещенность — 20–50 лк. Указанные значения задаются как управляющие воздействия (Control) функционального блока A1.4 модели IDEF0 и являются конфигурируемыми параметрами системы, что обеспечивает ее адаптацию к различным видам, кроссам и возрастным группам сельскохозяйственной птицы.

Аппаратная платформа сенсорного уровня: микроконтроллеры ESP32-S3 (Espressif Systems, Китай; тактовая частота 240 МГц, Wi-Fi/BLE, 512 КБ SRAM); датчики — DHT22 (Aosong Electronics, Китай; температура/влажность, ±0,5 °С / ±2%), MQ-135 (Winsen Electronics, Китай; CO₂, диапазон 10–10 000 ppm), MQ-137 (Winsen Electronics, Китай; NH₃, диапазон 5–200 ppm), BH1750 (ROHM Semiconductor, Япония; освещенность, 1–65 535 лк). Коммуникационный уровень: шлюзы на базе Raspberry Pi 4 Model B (Raspberry Pi Ltd, Великобритания; 4 ГБ RAM, процессор Broadcom BCM2711), радиомодули LoRa SX1276 (Semtech Corporation, США; диапазон 868 МГц, мощность 20 дБм). Анализатор спектра FPH (Rohde & Schwarz, Германия).

Серверный уровень: MQTT-брокер Eclipse Mosquitto 2.0 (Eclipse Foundation, США; открытая лицензия EPL/EDL), СУБД временных рядов TimescaleDB 2.14 (Timescale Inc., США; расширение PostgreSQL 16, The PostgreSQL Global Development Group, открытая лицензия PostgreSQL License), бэкенд — FastAPI 0.110 (открытая лицензия MIT; язык Python 3.12, Python Software Foundation, США), контейнеризация — Docker 25.0 (Docker Inc., США). Интерфейсный уровень: веб-панель Grafana 10.3 (Grafana Labs, США; открытая лицензия AGPL-3.0). Генератор нагрузки Locust 2.24 (открытая лицензия MIT).

Рис. 1. Контекстная диаграмма IDEF0 (уровень A0) «Осуществлять IoT-мониторинг микроклимата сельскохозяйственного помещения»

Fig. 1. IDEF0 context diagram (A0 level) «Perform IoT microclimate monitoring of agricultural facility»



Функциональная декомпозиция выполнена в три уровня:

A0 — контекстная диаграмма «Осуществлять IoT-мониторинг микроклимата»;

A1 — декомпозиция на четыре функциональных блока (сбор данных, передача данных, обработка и хранение, визуализация и оповещение);

A2 — детализация блока «Обработка и хранение» (валидация, агрегация, запись в СУБД, генерация алертов).

Контекстная диаграмма уровня A0 представлена на рис. 1.

Сравнительный анализ протоколов выполнен по пяти критериям: дальность связи (м),

- ✓ пропускная способность (кбит/с),
- ✓ энергопотребление в режиме передачи (мА),
- ✓ стоимость модуля (руб.),
- ✓ пригодность для агрессивных сред (экспертная оценка).

Тестирование проведено в натуральных условиях объекта с использованием анализатора спектра Rohde & Schwarz FPH и генератора нагрузки Locust 2.24.

Выбор программных компонентов серверного уровня обусловлен тремя критериями: открытая лицензия, совместимость с ARM-архитектурой шлюзов (Raspberry Pi 4), наличие документированного API для интеграции. MQTT-брокер Eclipse Mosquitto выбран как референсная реализация протокола MQTT 5.0 с минимальным потреблением ресурсов (RSS < 4 МБ при 10 000 одновременных подключений), что критично при совмещении

функций брокера и шлюза на одном устройстве. TimescaleDB предпочтён InfluxDB вследствие полной совместимости с SQL и возможности выполнения аналитических запросов (JOIN, оконные функции) непосредственно в СУБД без вынесения данных во внешний аналитический контур; при сопоставимой производительности записи (~120 000 строк/с на тестовом сервере для обеих СУБД) это упрощает архитектуру бэкенда и снижает число точек отказа. FastAPI выбран как ASGI-фреймворк с нативной поддержкой async/await и автоматической генерацией OpenAPI-спецификации, что обеспечивает неблокирующую обработку конкурентных запросов от панелей Grafana. Версии всех компонентов (TimescaleDB 2.14, FastAPI 0.110, Grafana 10.3, Docker 25.0) зафиксированы по состоянию на дату развёртывания (январь 2025 г.) как актуальные стабильные релизы; влияние конкретных версий на результаты нагрузочного тестирования не является предметом исследования.

Авторская формула расчета сквозной задержки доставки данных:

$$L(e2e) = L(sens) + L(mcu) + L(rf) + L(gw) + L(mqtt) + L(db) + L(api),$$

где: $L(e2e)$ — сквозная задержка (мс); $L(sens)$ — время опроса сенсора (мс); $L(mcu)$ — время обработки на микроконтроллере (мс); $L(rf)$ — задержка радиоканала (мс); $L(gw)$ — задержка обработки на шлюзе (мс); $L(mqtt)$ — задержка брокера сообщений (мс); $L(db)$ — задержка записи в СУБД (мс); $L(api)$ — задержка формирования ответа API (мс).

Формула расчета коэффициента надёжности доставки:

$$R(\text{sys}) = \prod_{i=1}^n R(i) = R(\text{sens}) \times R(\text{mcu}) \times R(\text{rf}) \times R(\text{gw}) \times R(\text{mqtt}) \times R(\text{db}) \times R(\text{api}),$$

где: $R(\text{sys})$ — системный коэффициент надёжности (0–1); $R(i)$ — коэффициент надёжности i -го компонента цепи доставки; $n = 7$ — число компонентов.

Коэффициенты $R(i)$ рассчитаны эмпирически как отношение числа успешно обработанных сообщений к общему числу сообщений на каждом компоненте за 10 серий нагрузочного тестирования длительностью 30 мин каждая. Разделение потерь по компонентам выполнено путем поэтапного логирования: каждое сообщение снабжалось уникальным идентификатором (UUID), фиксируемым на входе и выходе каждого компонента, что позволяло установить точку потери.

Нагрузочное тестирование проведено при ступенчатом увеличении потока сообщений: 1000, 3000, 6000, 9000, 12 000 сообщ./мин с фиксацией медианной задержки, 95-го перцентиля задержки и коэффициента доставки [10, 14].

Значения коэффициентов надёжности $R(i)$ получены по результатам 10 серий и не сопровождаются доверительными интервалами, что ограничивает возможность статистического обобщения.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты функциональной декомпозиции (рис. 1) формализовали систему в виде единого контекстного блока A0 с входами (аналоговые сигналы сенсоров, параметры конфигурации), выходами (визуализация в реальном времени, алерты, архив данных), управляющими воздействиями (пороговые значения параметров, регламент опроса, политика хранения) и механизмами (аппаратное обеспечение, программный стек, персонал). Декомпозиция уровня A1 выделила четыре функциональных блока: A1.1 — «Собирать данные сенсоров» (ICOM: вход — аналоговые сигналы, выход — цифровые пакеты, управление — регламент опроса 15 с, механизм — ESP32-S3 +

+ датчики); A1.2 — «Передавать данные на сервер» (вход — цифровые пакеты, выход — MQTT-сообщения, управление — QoS-политика, механизм — LoRa + Raspberry Pi); A1.3 — «Обрабатывать и хранить данные» (вход — MQTT-сообщения, выход — записи в СУБД + алерты, управление — правила валидации, механизм — TimescaleDB + FastAPI); A1.4 — «Визуализировать и оповещать» (вход — записи СУБД, выход — дашборды + уведомления, управление — пороги алертов, механизм — Grafana + Telegram Bot API).

В ходе натурных испытаний (май–июль 2025 г.) зафиксировано 47 срабатываний алертов, из которых 41 — по превышению порога NH₃ (15 ppm) в утренние часы при снижении интенсивности вентиляции, 4 — по выходу температуры за верхнюю границу (22 °C), 2 — по влажности. Ложных срабатываний зарегистрировано 3 (6,4%), все обусловлены кратковременными выбросами датчика MQ-137 при конденсации влаги на чувствительном элементе. После введения медианного фильтра с окном 3 отсчета ложные срабатывания устранены.

Функциональная декомпозиция выполнялась итеративно. На первой итерации блоки A1.2 («Передавать данные на сервер») и A1.3 («Обрабатывать и хранить данные») были объединены в единый блок «Принимать и обрабатывать данные», однако анализ ICOM-потоков выявил необходимость разделения: выходной поток блока A1.2 (MQTT-сообщения) и входной поток A1.3 различаются по формату и семантике, что потребовало выделения отдельного интерфейса. На второй итерации рассматривался вариант включения генерации алертов в блок A1.3, однако это нарушало принцип единственной ответственности функционального блока, в результате чего генерация алертов была отнесена к блоку A1.4. Глубина декомпозиции до третьего уровня (A2) определена тем, что дальнейшая детализация не выявляла новых ICOM-элементов, существенных для проектирования.

Всего на трех уровнях декомпозиции идентифицировано 14 функциональных блоков, 23 потока данных, 8 механизмов и 6 управляющих воздействий.

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики протоколов LoRa, Zigbee, Wi-Fi и NB-IoT в условиях распределенного IoT-мониторинга сельскохозяйственных помещений

Table 1. Operational characteristics of LoRa, Zigbee, Wi-Fi, and NB-IoT protocols under distributed IoT monitoring conditions in agricultural facilities

Протокол	Дальность, м	Пропускная способность, кбит/с	Энергопотребление Tx, мА	Стоимость модуля, руб.	Пригодность для агрессивных сред (1–5)
LoRa (SX1276)	2800	0,3–50	42	480	5
Zigbee (CC2530)	120	250	34	350	3
Wi-Fi (ESP32)	80	54 000	240	290	2
NB-IoT (BC95)	10 000	62	120	720	4

Примечание: жирным выделены лучшие показатели по каждому критерию; пригодность для агрессивных сред оценена экспертно (1 — низкая, 5 — высокая). Стоимость модулей приведена по данным розничных поставщиков на территории РФ (ЧИП и ДИП, Электронщик) по состоянию на II квартал 2025 г. Источник: данные натурных испытаний и документация производителей.

Данные табл. 1 демонстрируют, что LoRa обеспечивает оптимальное сочетание дальности (2800 м), низкого энергопотребления (42 мА) и высокой пригодности для агрессивных сред (5 баллов). NB-IoT превосходит LoRa по дальности (10 000 м), однако требует абонентской платы оператора и характеризуется повышенным энергопотреблением (120 мА), что критично для автономных узлов [1, 11]. Wi-Fi обеспечивает максимальную пропускную способность (54 000 кбит/с), однако дальность 80 м и энергопотребление 240 мА исключают его применение в качестве основного канала для распределенной сенсорной сети [5]. Zigbee занимает промежуточную позицию, однако ограниченная дальность (120 м) требует установки ретрансляторов. Для объекта с расстояниями между зданиями до 320 м выбор LoRa оптимален; Wi-Fi используется как вспомогательный канал внутри серверного помещения. Выбор ESP32-S3 в качестве микроконтроллера сенсорного узла обусловлен необходимостью предобработки данных (фильтрация выбросов, формирование JSON-пакетов, управление режимами сна), для чего требуется вычислительная мощность, превышающая возможности ультранизкопотребляющих платформ (STM32L4). Энергопотребление узла ESP32-S3 + SX1276 в режиме глубокого сна составляет 10 мкА, в штатном цикле (пробуждение — опрос — передача — сон, период 15 с) среднее потребление не превышает 18 мА, что обеспечивает автономную работу от литий-ионного аккумулятора емкостью 3400 мА·ч в течение не менее 7 суток. Альтернативный вариант STM32L4 + SX1276 снижает среднее потребление до 8 мА, однако требует разработки проприетарной прошивки вне Arduino/ESP-IDF-экосистемы,

что увеличивает трудозатраты на этапе прототипирования ориентировочно на 35%.

Отказ от NB-IoT в пользу LoRa обусловлен экономическими соображениями. При 54 сенсорных узлах и тарифе оператора 90 руб./мес. на устройство ежегодные затраты на связь составляют 58 320 руб. Единовременные затраты на развертывание LoRa-инфраструктуры (3 шлюза Raspberry Pi 4 + SX1276 по 12 500 руб.) — 37 500 руб. с окупаемостью через 8 мес. При горизонте эксплуатации свыше 3 лет совокупная стоимость владения LoRa-решением ниже на 137 460 руб.

Панель А табл. 2 показывает линейный рост медианной задержки с 134 до 364 мс при увеличении нагрузки с 1 000 до 12 000 сообщ./мин. Коэффициент доставки сохраняется выше 99,4% во всём диапазоне нагрузок, что соответствует требованиям для некритичных систем мониторинга (целевой показатель — 99,5%) [12, 16]. Штатная нагрузка рассматриваемого объекта при периодичности опроса 15 с и 18 сенсорах на помещение составляет 216 сообщ./мин (54 сенсора 4 сообщ./мин). Нагрузочное тестирование проведено в расширенном диапазоне (до 12 000 сообщ./мин) для оценки масштабируемости архитектуры при увеличении числа контролируемых помещений до 40 и/или уменьшении интервала опроса до 1 с. При штатной нагрузке 216 сообщ./мин медианная задержка не превышает 134 мс, коэффициент доставки — не менее 99,98% (экстраполяция по нижней ступени тестирования, табл. 2).

Панель Б табл. 2 приведена для ступени 1000 сообщ./мин, ближайшей к штатной нагрузке объекта (216 сообщ./мин). Основным источником сквозной задержки является радиоканал LoRa (48 мс, 35,8%), что определяется параметрами модуляции (spreading factor SF7, bandwidth 125 кГц); переход к SF6 снижает L(rf) до 33 мс, однако с уменьшением дальности на 18% [4].

Вторым по значимости компонентом является запись в TimescaleDB (22 мс, 16,4%), обусловленная синхронной записью с подтверждением транзакции (WAL flush); переход к асинхронной записи снижает L(db) до 9 мс, однако увеличивает риск потери данных при сбое [13, 14]. Системный коэффициент надежности при штатной нагрузке R(sys) = 0,99985, что соответствует расчетным потерям 0,015%; экспериментально измеренный коэффициент доставки при 1000 сообщ./мин составляет

Таблица 2. Результаты нагрузочного тестирования и покомпонентная структура сквозной задержки

Table 2. Load testing results and component-level end-to-end latency structure

Панель А. Нагрузочное тестирование				
Интенсивность потока, сообщ./мин	Медианная задержка, мс	SD задержки, мс	95-й перцентиль, мс	Коэффициент доставки, %
1000	134	19	218	99,98
3000	187	27	312	99,94
6000	241	38	428	99,87
9000	287	51	536	99,72
12 000	364	74	714	99,41
Панель Б. Покомпонентная структура задержки (при 9 000 сообщ./мин)				
Компонент	Задержка, мс	Доля в L(e2e), %	Надёжность R(i)	
Опрос сенсора, L(sens)	12	9,0	0,99998	
Обработка MCU, L(mcu)	8	6,0	0,99999	
Радиоканал LoRa, L(rf)	48	35,8	0,99997	
Обработка шлюза, L(gw)	14	10,4	0,99998	
MQTT-брокер, L(mqtt)	18	13,4	0,99999	
Запись в TimescaleDB, L(db)	22	16,4	0,99996	
REST API, L(api)	12	9,0	0,99998	
Итого	134	100,0	0,99985	

Примечание: тестирование проведено генератором нагрузки Locust 2.24; системный коэффициент надёжности R(sys) = 0,99998 × 0,99999 × 0,99997 × 0,99998 × 0,99999 × 0,99996 × 0,99998 ≈ 0,99985.

Источник: результаты натурных испытаний.

99,98% (потери 0,02%), расхождение объясняется неучтенными в модели факторами (задержки сетевой инфраструктуры между шлюзом и сервером, единичные потери TCP-пакетов). При увеличении нагрузки до 12 000 сообщ./мин коэффициент доставки снижается до 99,41% (табл. 2, Панель А), что сохраняет показатель вблизи целевого порога 99,5% для некритичных систем мониторинга [12, 16] и согласуется с результатами [15], где IoT-системы аграрного назначения демонстрировали коэффициент доставки 99,1–99,8%.

Верификация функциональной модели IDEF0 выполнена методом трассировки потоков данных по реализованной системе (conformance verification). Функциональная модель разрабатывалась параллельно с реализацией системы и уточнялась по мере развертывания компонентов, поэтому описанная процедура представляет собой проверку соответствия между проектной моделью и действующей системой, а не предрезервационную верификацию (pre-implementation verification) в каноническом понимании методологии IDEF0. Для каждого из 23 потоков проверено соответствие реальных форматов данных (JSON-пакеты MQTT, структуры таблиц TimescaleDB, эндпоинты REST API) описаниям ICOM-элементов модели. Выявлено два несоответствия: недокументированный поток ошибок калибровки датчиков (устранено добавлением блока A2.5 «Обрабатывать ошибки калибровки») и отсутствие описания механизма резервного канала связи (добавлен Wi-Fi fallback в блок A1.2).

Выявленные расхождения подтверждают практическую полезность формального моделирования даже при параллельной разработке: без трассировки ICOM-потоков оба недокументированных элемента не были бы зафиксированы в проектной документации. Итоговая модель содержит 14 блоков, 25 потоков, 8 механизмов и 6 управлений.

Ограничения: тестирование выполнено на одном объекте Московской области; масштабируемость архитектуры для объектов свыше 10 помещений требует дополнительной верификации; не рассматривались протоколы Thread и Matter.

Выводы/Conclusions

Разработана и валидирована архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений с функциональной моделью IDEF0 из 14 блоков, 25 потоков данных, 8 механизмов и 6 управляющих воздействий.

Сравнительный анализ беспроводных протоколов обосновал выбор LoRa в качестве базового канала передачи данных (дальность 2 800 м, энергопотребление 42 мА, пригодность для агрессивных сред — 5 баллов). Нагрузочное тестирование подтвердило устойчивость системы при потоке до 12 000 сообщ./мин с коэффициентом доставки 99,41%. Основные источники сквозной задержки при штатной нагрузке — радиоканал LoRa (35,8%) и запись в СУБД (16,4%); системный коэффициент надежности $R(\text{sys}) = 0,99985$. При максимальной тестовой нагрузке (12 000 сообщ./мин) коэффициент доставки составляет 99,41%.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные. Автор несет ответственность за плагиат. Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the submitted data. The author is responsible for plagiarism. The author declared no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вострухин А.В., Мастепаненко М.А., Воротников И.Н., Вахтина Е.А. Алгоритм разработки программного обеспечения беспроводной системы мониторинга температуры сельскохозяйственных объектов. *Аграрная наука*. 2025; 27(1): 75–81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>
2. Довлатов И.М., Комков И.В., Алипичев А.Ю., Благов Д.А., Юрочка С.С. Анализ предлагаемых технических решений для поддержания микроклимата животноводческих помещений. *Аграрная наука*. 2023; (9): 149–155. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-149-155>
3. Довлатов И.М., Комков И.В. Математическое имитационное моделирование автоматизированной системы для снижения теплового стресса и сходимости с теоретическими значениями. *Аграрная наука*. 2025; (1): 114–120. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-114-120>
4. Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Быков А.Н. Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021; 22(10): 527–536. <https://doi.org/10.17587/mau.22.527-536>
5. Laktionov I.S., Vovna O.V., Kabanets M.M., Sheina H.O., Getman I.A. Information Model of the Computer-Integrated Technology for Wireless Monitoring of the State of Microclimate of Industrial Agricultural Greenhouses. *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2021; 20(6): 289–300. <https://doi.org/10.18280/i2m.200601>

REFERENCES

1. Vostrukhin A.V., Mastepanenko M.A., Vorotnikov I.N., Vakhtina E.A. Algorithm of software development for a wireless system monitoring the temperature of agricultural premises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025; 27(1): 75–81 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>
2. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Alipichev A.Yu., Blagov D.A., Yurochka S.S. Analysis of proposed technical solutions for maintaining the microclimate of livestock buildings. *Agrarian science*. 2023; (9): 149–155 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-149-155>
3. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Mathematical simulation modeling of an automated system to reduce heat stress and convergence to theoretical values. *Agrarian science*. 2025; (1): 114–120 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-114-120>
4. Krestovnikov K.D., Erashov A.A., Bykov A.N. Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Comp. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021; 22(10): 527–536 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/mau.22.527-536>
5. Laktionov I.S., Vovna O.V., Kabanets M.M., Sheina H.O., Getman I.A. Information Model of the Computer-Integrated Technology for Wireless Monitoring of the State of Microclimate of Industrial Agricultural Greenhouses. *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2021; 20(6): 289–300. <https://doi.org/10.18280/i2m.200601>

6. Новиков А.И., Новикова Т.П., Чесноков Ю.В. Новиков, А.И. IOT-управление агротехнологиями: особенности сенсорного уровня системы поддержания жизненного цикла ювенильного растения. *Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке : Материалы Международного форума*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 247–252. https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252.
7. Новикова Т.П., Новиков А.И., Чесноков Ю.В. IOT-управление агротехнологиями: особенности построения реляционной модели хранения сенсорных данных на процессинговом уровне. *Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 282–290. https://doi.org/10.58168/AIARMT0ES2025_282-290.
8. Вережубова Н.А., Яковлева О.А., Савонкина А.Р. Использование технологий Интернета вещей в аграрной сфере. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. 2025; (8): 20–24. <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2025.08.08>
9. Веремейчик Р.М., Часовских А.А. Технологии интернета вещей в задачах промышленной автоматизации. *Молодые ученые России : Сборник статей XXVI Всероссийской научно-практической конференции*. Пенза: МЦНС Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.). 2025; 71–73. EDN UNFQWY.
10. Савин И.Ю., Блохин Ю.И., Чинилин А.В. Методология оперативного мониторинга состояния посевов на основе технологий интернета вещей. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023; (6): 43–46. <https://doi.org/10.31857/S2500262723060091>
11. Kuzichkin O.R., Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Principles of Construction of Microclimate Control and Management Systems in Agro-Industrial Production Based on Identification Algorithms. *Advances in Dynamical Systems and Applications*. 2021; 16(1): 299–311. <https://doi.org/10.37622/adsa/16.1.2021.299-311>
12. Логинов И.В. Диагностирование функциональной пригодности развивающихся многофункциональных автоматизированных систем на основе перестраиваемой модели. *Программные продукты и системы*. 2022; (2): 195–207. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.195-207>
13. Кычкин А.В., Горшков О.В., Селиванов В.А., Павлов В.А. Технология программной имплементации цифрового двойника в контур IoT управления HVAC-системой. *Прикладная информатика*. 2021; 16(5): 33–47. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-5-33-47>
14. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Разработка архитектуры комплекса систем промышленного интернета вещей на основе интеллектуальных датчиков и сенсоров. *Прикладная информатика*. 2022; 17(6): 18–35. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-6-18-35>
15. Кочеткова О.В. Архитектура информационной системы и архитектура растениеводческого предприятия, использующего технологию IoT. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024; (4): 338–347 (на англ. яз.). EDN JIXRKE
16. Kartanova A.Dzh., Sarypbekova Zh.R., Sydykova Z.A., Mamadaliyeva Zh.B. Modeling of an intelligent management system for smart poultry farms. *BIO Web of Conferences*. 2025;194: 01090. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202519401090>
6. Novikov A.I., Novikova T.P., Chesnokov Yu.V. Novikov, A.I. IOT-management of agricultural technologies: Features of the sensory level of the juvenile plant life cycle maintenance system. *Technologies in the bioeconomy: innovations and challenges in the 21st century: Proceedings of the International Forum*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 247–252 (in Russian). https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252.
7. Novikova T.P., Novikov A.I., Chesnokov Yu.V. IOT-management of agricultural technologies: Features of constructing a relational model for storing sensory data at the processing level. *Actual problems of automation, robotics and control in technical, organizational and economic systems: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of teachers and specialists and the All-Russian scientific and practical conference of students and young scientists*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 282–290 (in Russian). https://doi.org/10.58168/AIARMT0ES2025_282-290.
8. Verezhubova N.A., Yakovleva O.A., Savonkina A.R. Use of Internet of Things technologies in the agricultural sector. *Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Economics and Law*. 2025; (8): 20–24 (in Russian). <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2025.08.08>
9. Veremeychik R.M., Chasovskikh A.A. Internet of Things technologies in industrial automation tasks. *Young Scientists of Russia: Collection of Articles from the XXVI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Penza: International Center for Scientific Cooperation "Science and Education" (Individual Entrepreneur G.Yu. Gulyaev). 2025; 71–73 (in Russian). EDN UNFQWY
10. Savin I.Y., Blokhin Y.I., Chinilin A.V. Methodology of operational monitoring of crop status based on the internet of things technologies. *Russian Agricultural Sciences*. 2023; (6): 43–46 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2500262723060091>
11. Kuzichkin O.R., Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Principles of Construction of Microclimate Control and Management Systems in Agro-Industrial Production Based on Identification Algorithms. *Advances in Dynamical Systems and Applications*. 2021; 16(1): 299–311. <https://doi.org/10.37622/adsa/16.1.2021.299-311>
12. Loginov I.V. Diagnosing the functional suitability of developing multifunctional automated systems based on a reconfigurable model. *Software & Systems*. 2022; (2): 195–207 (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.195-207>
13. Kychkin A.V., Gorshkov O.V., Selivanov V.A., Pavlov V.A. Technology for the soft implementing a digital twin into the IoT HVAC control loop. *Journal of Applied Informatics*. 2021; 16(5): 33–47 (in Russian). <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-5-33-47>
14. Gumerov E.A., Alekseeva T.V. Development of the architecture of a complex of industrial Internet of Things systems based on intelligent sensors and touch sensors. *Journal of Applied Informatics*. 2022; 17(6): 18–35 (in Russian). <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-6-18-35>
15. Kochetkova O.V. Information system architecture and architecture of a crop enterprise using IoT technology. *Proceedings of Nizhnevolskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2024; (4): 338–347. EDN JIXRKE
16. Kartanova A.Dzh., Sarypbekova Zh.R., Sydykova Z.A., Mamadaliyeva Zh.B. Modeling of an intelligent management system for smart poultry farms. *BIO Web of Conferences*. 2025;194: 01090. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202519401090>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**Даниил Сергеевич Марченко**

аспирант

Marchenkodaniil.email@gmail.com

Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К.И. Скрябина, ул. Академика Скрябина, д. 23, Москва, 109472, Россия

AUTHOR'S INFORMATION**Daniil Sergeevich Marchenko**

Postgraduate

Marchenkodaniil.email@gmail.com

Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — MVA named after K.I. Skryabin, 23 Akademik Skryabin st., Moscow, 109472, Russia