

научно-теоретический и производственный журнал

АГРАРНАЯ НАУКА

AGRARIAN
SCIENCE

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

2
2026



БЕСПЛАТНО
скачать журнал
и подписаться



Подпишитесь
на наш
Telegram канал!



ВЕТЕРИНАРИЯ

Полиорганная недостаточность
у бурого медведя в условиях
неволи

8

АГРОНОМИЯ

Оценка эффективности инокулянтов
грибов арбускулярной микоризы
и перспективы их применения
в сельском хозяйстве

91

ЭКОНОМИКА

Факторы развития рынка
предложения какао-продуктов
в РФ в контексте реализации
национальных целей

149

**V МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
КОРМОВ, КОРМОВЫХ ДОБАВОК, ВЕТЕРИНАРИИ И ОБОРУДОВАНИЯ**

**27 - 29
ОКТАБРЯ**

**КормВет^{экспо}
Грэй^н 2026**

МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО», ПАВИЛЬОН 2

СВИНОВОДСТВО | ПТИЦЕВОДСТВО | ЖИВОТНОВОДСТВО | АКВАКУЛЬТУРА

ПРОВОДИТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ И УЧАСТИИ



- КОРМА, КОМБИКОРМА, КОРМОВЫЕ ДОБАВКИ
- ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМБИКОРМОВ, ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА И МАСЛИЧНЫХ
- ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- ВЕТЕРИНАРНЫЕ ПРЕПАРАТЫ
- ВЕТЕРИНАРНЫЙ И ЗООТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ
- СРЕДСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ



НАС ВЫБИРАЮТ ПРОФЕССИОНАЛЫ!



**+7 (499) 649-50-20
INFO@FEEDVET-EXPO.RU**

FEEDVET-EXPO.RU

2 · 2026

Agrarnaya nauka

Том 403, номер 2, 2026

Volume 403, number 2, 2026

ISSN 0869-8155 (print)

ISSN 2686-701X (online)

© 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.

Редактор-корректор Кузнецова Г.М.

Библиограф Нерозник Д.С.

Журналист Седова Ю.Г.

Менеджер по работе с клиентами Теплова А.С.

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 13.02.2026

Дата выхода в свет 20.02.2026

Отпечатано в типографии ООО «Поли Принт Сервис», 127015, г. Москва, ул. Бутырская, д. 86

АГРАРНАЯ НАУКА

AGRARIAN SCIENCE

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

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.Р. 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

ЗООТЕХНИЯ 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 и технологический 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, профессор, 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.

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

Щербачев 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. Сельчуку-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. Редут, 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

Бабиш 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.А., 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. Полежкова, 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.

2 · 2026

Agrarnaya nauka

Том 403, номер 2, 2026

Volume 403, number 2, 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.
Editor-proofreader Kuznetsova G.M.
Bibliographer Neroznik D.S.
Journalist Sedova Yu.G.
Account Manager Teplova A.S.

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 13.02.2026

Release date 20.02.2026

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

АГРАРНАЯ НАУКА AGRARIAN 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.

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 Afforestation 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

Любченко Е.Н., Волков С.В. Полиорганная недостаточность у бурого медведя (<i>Ursus arctos</i>) в условиях неволи. Описание клинического случая	8
Миорова И.В., Хабибуллин Р.М., Хабибуллин И.М. Морфологические изменения в мышечной ткани бычков после применения апиадаптогена.....	19
Колбасова М.А., Виолин Б.В., Селиванова Е.К., Проскурина О.В., Сизюхин А.В. Влияние тофацитиниба при однократном и длительном применении на функциональное состояние сердечно-сосудистой системы и клиническое состояние собак: пилотное исследование	31

ЗООТЕХНИЯ

Ребезов Я.М., Ребезов М.Б., Медведева У.Ю. Перспектива применения лактоферрина в животноводстве	40
Горелик А.С., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю., Эйриян Н.А., Исаева К.С., Кульмакова Н.И. Оценка изменчивости молочных признаков коров в зависимости от лактационной деятельности	60
Косилов В.И., Юлдашбаев Ю.А., Никонова Е.А., Рахимжанова И.А., Калякина Р.Г., Быкова О.А., Седых Т.А., Неверова О.П., Амиршоев Ф.С. Влияние генотипа и кастрации баранчиков на потребление и усвоение валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона.....	68

АГРОНОМИЯ

Кибальник О.П. Изучение фенологических особенностей гибридов сахарного сорго на основе цитоплазмы А2 при возделывании в условиях Саратовской области.....	76
Семин Д.С., Ефремова И.Г., Куколева С.С., Старчак В.И. Селекция зернового сорго для повышения ассортимента зернофуражных культур в засушливых регионах России	83
Юрков А.П., Крюков А.А., Кудряшова Т.Р., Беляева А.И., Никитин С.Н. Оценка эффективности инокулянтов грибов арбускулярной микоризы и перспективы их применения в сельском хозяйстве	91
Рассохина И.И., Ерегина С.В., Сухарева Л.В., Платонов А.В. Микробиом борщевика как резервуар бактерий, обладающих биотехнологическим потенциалом (обзор).	99

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лукин А.А. Методы идентификации микропластиков в пищевых системах	110
Кондратьев Н.Б., Казанцев Е.В., Осипов М.В., Баженова А.Е. Закономерности процессов влагопереноса в процессе хранения глазированных конфет со сбивными корпусами при различных температурах	128
Горбунова Н.А., Ребезов М.Б., Бабурина М.И. Роль факторов, влияющих на формирование вкуса и аромата мясных изделий (обзор, часть 1-я)	135

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Макар С.В., Хачатрян А.А. Факторы развития рынка предложения какао-продуктов в России в контексте реализации национальных целей в период трансформации миропорядка	149
--	-----

CONTENTS

VETERINARY MEDICINE

<i>Lyubchenko E.N., Volkov S.V.</i> Polyorgan Failure in a Captive Brown Bear (<i>Ursus arctos</i>). A Clinical Case Description	8
<i>Mironova I.V., Khabibullin R.M., Khabibullin I.M.</i> Morphological changes in muscle tissue of bulls after the use of apiadaptogen	19
<i>Kolbasova M.A., Violin B.V., Selivanova E.K., Proskurina O.V., Sizyukhin A.V.</i> The effect of tofacitinib with single and prolonged use on the functional state of the cardiovascular system and the clinical condition of dogs: a pilot study	31

ZOOTECHNICS

<i>Rebezov Ya.M., Rebezov M.B., Medvedeva U.Yu.</i> Prospects for the use of lactoferrin in animal husbandry	40
<i>Gorelik A.S., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu., Eyrian N.A., Isaeva K.S., Kulmakova N.I.</i> Evaluation of variability of dairy characteristics of cows depending on lactation activity	60
<i>Kosilov V.I., Yuldashbaev Yu.A., Nikonova E.A., Rakhimzhanova I.A., Kalyakina R.G., Bykova O.A., Sedykh T.A., Neverova O.P., Amirshoev F.S.</i> The influence of the genotype and castration of sheep on the consumption and assimilation of gross energy of individual nutrients in the feed diet.	68

AGRONOMY

<i>Kibalnik O.P.</i> Study of the phenological characteristics of sugar sorghum hybrids based on A2 cytoplasm when cultivated in the Saratov region.....	76
<i>Semin D.S., Efremova I.G., Kukoleva S.S., Starchak V.I.</i> Breeding grain sorghum to increase the range of grain forage crops in the arid regions of Russia	83
<i>Yurkov A.P., Kryukov A.A., Kudryashova T.R., Belyaeva A.I., Nikitin S.N.</i> Evaluation of the efficiency of arbuscular mycorrhiza fungal inoculants and prospects for their use in agriculture.....	91
<i>Rassokhina I.I., Eregina S.V., Sukhareva L.V., Platonov A.V.</i> Hogweed microbiome as a reservoir of bacteria with biotechnological potential (review)	99

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Lukin A.A.</i> Methods for identifying microplastics in food systems	110
<i>Kondratiev N.B., Kazantsev E.V., Osipov M.V., Bazhenova A.E.</i> Patterns of moisture transfer processes during storage of glazed sweets with whipped bodies at different temperatures	128
<i>Gorbusova N.A., Rebezov M.B., Baburina M.I.</i> The Role of Factors Affecting the Formation of Taste and Aroma of Meat Products (review, part 1).....	135

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

<i>Makar S.V., Khachatryan A.A.</i> Factors of development of the cocoa products supply market in Russia in the context of the implementation of national goals during the transformation of the world order	149
--	-----

УДК 619:616-008.64:599.742.21:791.82

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-8-18

Е.Н. Любченко¹ ✉

С.В. Волков²

¹Приморский государственный аграрно-технологический университет, Уссурийск, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

✉ LyubchenkoL@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.12.2025

Одобрена после рецензирования: 11.12.2025

Принята к публикации: 26.01.2026

© Любченко Е.Н., Волков С.В.

Полиорганная недостаточность у бурого медведя (*Ursus arctos*) в условиях неволи. Описание клинического случая

РЕЗЮМЕ

Бурые медведи содержатся в различных условиях неволи, которые могут сильно ухудшать их состояние. Гиперадренокортицизм, вызванный гормональным нарушением в результате длительного содержания в неволе и стресс-факторами и приведший к полиорганной недостаточности, ранее не наблюдался и не был описан у медведей. Повышенная секреция кортизола приводит не только к поражению внутренних органов, но и к сахарному диабету, снижению иммунной резистентности и, как следствие, к потере способности иммунной системы распознавать и уничтожать патогенные микроорганизмы. В литературных источниках встречаются сообщения о гибели животных, живущих в неволе, в результате бактериальных инфекций (например, генерализованный клостридиоз у гималайского медведя, легочной нocardiosis тихоокеанской афалины, грибковое поражение легких у северного оленя). Однако ни в одной из данных работ не проводились детального патологоанатомического и гистологического исследования всех органов. Представленный авторами клинический случай полиорганной недостаточности у бурого медведя в условиях зоопарка объединяет данные анамнеза, симптоматику, результаты лабораторных и инструментальных показателей при жизни животного, а также результаты патоморфологического, гистологического и гистохимического исследований. Эти данные позволяют рекомендовать зоопаркам минимизировать стресс-факторы у животных при их содержании, при необходимости прибегать к медикаментозной коррекции стресса, а также проводить ежеквартальную диспансеризацию для раннего выявления болезни и проведения своевременной и целенаправленной терапии.

Ключевые слова: бурый медведь, зоопарк, полиорганная недостаточность, диагностика, клинический случай

Для цитирования: Любченко Е.Н., Волков С.В. Полиорганная недостаточность у бурого медведя (*Ursus arctos*) в условиях неволи. Описание клинического случая. *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 8–18.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-8-18>

Scientific article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-8-18

Elena N. Lyubchenko¹ ✉

Sergey V. Volkov²

¹Primorsky State Agro-Technological University, Ussuriysk, Russia

²Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

✉ LyubchenkoL@mail.ru

Received by the editorial office: 08.12.2025

Accepted in revised: 11.12.2025

Accepted for publication: 26.01.2026

© Lyubchenko E.N., Volkov S.V.

Polyorgan Failure in a Captive Brown Bear (*Ursus arctos*). A Clinical Case Description

ABSTRACT

Brown bears are kept in various captive conditions, some of which can significantly deteriorate their health. Hyperadrenocorticism, caused by a hormonal disorder resulting from prolonged captivity and stress factors, and leading to multiple organ failure, has not been previously observed or described in bears. Increased cortisol secretion not only leads to damage of internal organs but also to diabetes mellitus, decreased immune resistance, and consequently, to the loss of the immune system's ability to recognize and destroy pathogenic microorganisms. In literary sources, there are reports of deaths of animals living in captivity as a result of bacterial infections (for example, generalized clostridiosis in the Himalayan bear, pulmonary nocardiosis in the Pacific bottlenose dolphin, fungal lung disease in reindeer). However, none of these studies conducted detailed post-mortem and histological examinations of all organs. The clinical case of multiple organ failure in a brown bear in a zoo setting presented by us combines anamnestic data, symptomatology, results of laboratory and instrumental parameters during the animal's life, as well as the results of pathomorphological, histological, and histochemical examinations. These data allow us to recommend that zoos minimize stress factors for animals in their care, resort to pharmacological correction of stress if necessary, and conduct quarterly health check-ups for early detection of disease and timely and targeted therapy.

Key words: brown bear, zoo, multiple organ failure, diagnosis, clinical case

For citation: Lyubchenko E.N., Volkov S.V. Polyorgan Failure in a Captive Brown Bear (*Ursus arctos*). A Clinical Case Description. *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 8–18 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-8-18>

Введение/Introduction

Медведи относятся к классу Mammalia (млекопитающие), отряду Carnivora (хищные), семейству Ursidae (медвежьи), которое подразделяется на род Ursus (медведи) с 4 видами: белогрудый медведь, белый медведь, бурый медведь и его подвид гризли, черный медведь. Иногда все эти виды считают самостоятельными родами¹.

Бурые медведи (*Ursus arctos*) чрезвычайно выносливые животные, но в то же время их преклонный возраст связан с развитием проблем, связанных с нарушением здоровья, на возникновение и развитие которых могут влиять условия содержания, неподходящая физическая среда, вынужденные неестественные для медведей позы и движения, недостаточное или неполноценное кормление.

Семейство медвежьих эволюционировало рано и непрерывно, становясь в итоге всеядными животными. По данным С.Т. Robbins (2022), медведи, находящиеся на рационе зоопарков, склонны к развитию гепатобилиарного рака и воспалительным заболеваниям кишечника [1].

Изучив рацион разных видов медведей, ученые пришли к выводу, что им требуется намного меньше белка, чем другим хищным, и преимущественно мясная диета в зоопарках может привести к сокращению срока их жизни. По информации В. Арнхольд и других ученых (1995), избыток жиров в рационе медведей может быть причиной возникновения аденокарциномы желчных протоков и воспалительных заболеваний кишечника [2]. По данным К.Д. Rode и соавт. (2021), избыток белка в рационе является причиной возникновения рака гепатобилиарной системы и заболеваний почек у содержащихся в неволе белых медведей [3].

Рацион бурых медведей в зоопарке состоит из сырой морской рыбы, черного и белого хлеба, сырой моркови, яблок, небольшого количества сырого мяса (зимой вареного). Сезонные фрукты, ягоды и овощи эти хищники получают периодически, мед или варенье им дают ежедневно, но в небольших количествах (по 15 г). Отсутствие разнообразных по химическому и биологическому составу кормов, недостаток витамина А, несоблюдение режима кормления в неволе приводят к развитию заболеваний пищеварительной системы. Медведи, содержащиеся в неволе, могут находиться в условиях зоопарков низкого качества, что соответствует низким стандартам благополучия животных — от неподходящей физической среды до неадекватного питания и даже неестественных для медведей поз и движений [4].

По результатам исследований D. Collins (2015), у бурых медведей, содержащихся в неволе, наблюдается повышенная частота патологий дистальных отделов конечностей, включая изменения подушечек лап, рогового слоя подошв и когтей, а также хронические и гнойные дермальные поражения (ссадины, раны, пролежни и рубцовые

изменения). Указанные животные демонстрируют высокую предрасположенность к заболеваниям гепатобилиарной системы [5].

У животных из цирковой среды не представляется возможным установить прямую причинно-следственную связь между происхождением и гепатопатиями, поскольку ключевым этиологическим фактором дегенеративных процессов в печени, вероятно, является длительное кормление несбалансированными и неадекватными потребностями рационами.

По данным Е. Stagni и соавт. (2023), болезни брюшной полости и пищеварительной системы, изменения желчного пузыря и желчевыводящих протоков, модификация и дегенерация печени были зарегистрированы у цирковых медведей [6].

Т.Н. Сивкова и другие ученые (2022 г.) описывают у животного, содержащегося в зоопарке Перми, патологоморфологические изменения при клостридиозе [7]. Об инфекциях, вызванных клостридиями (*C. septicum*, *C. sordellii*, *C. bifermentans*, *C. chauvoei*, *C. novyi*) у диких медведей после повреждения мышц, сообщали и другие исследователи [8–10]. G. Galateanu и другие ученые (2014) при изучении остеопатологии стоп отмечали, что часто заболевания анатомических систем содержащихся в неволе медведей оценивались только посмертно [11].

В условиях практической деятельности не всегда удастся в полном объеме оценить состояние диких животных. Любая врачебная манипуляция связана с обездвиживанием животного, что также негативно влияет на состояние его здоровья. Проблема установления прижизненного диагноза у крупных хищников в условиях зоопарков (в частности, провинциального города) остается актуальной, что связано с проведением обездвиживания, без чего невозможно применять парентерально лекарственные препараты и проводить инструментальное обследование. Поэтому, к сожалению, среди диких животных, содержащихся в том числе и в условиях неволи, смертность при многих заболеваниях остается достаточно высокой.

Цели исследования — разработка и демонстрация комплексного алгоритма диагностики, объединяющего методы прижизненной клинической оценки и посмертного патологоанатомического исследования с применением лабораторных анализов для установления окончательного диагноза и выяснения причины смерти, на примере клинического случая полиорганной недостаточности у бурого медведя (*Ursus arctos*), содержавшегося в условиях зоопарка.

Научная новизна и значимость работы заключаются в уникальности представленного комплексного подхода, впервые примененного к данному виду животных в условиях неволи. Совместный ретроспективный анализ анамнеза, клинической картины, результатов гематологических

¹ Ursidae (медвежьи, медведи).

URL: <https://zooclub.ru/wild/hish/medv.shtml>

исследований (проведенных при жизни) и детальных патоморфологических данных позволили не только верифицировать диагнозы, но и реконструировать патогенез заболевания, установив причинно-следственные связи, которые приводили к летальному исходу.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для патоморфологического исследования в апреле 2025 года из Пермского городского зоопарка поступил труп самца бурого медведя (*Ursus arctos*) в возрасте 25 лет. Исследование животного, погибшего после длительного лечения, проводили в условиях диагностического центра болезней животных Приморского государственного аграрно-технологического университета при искусственном освещении по методу полного патологоанатомического вскрытия.

Вид животного, возраст и пол определяли, используя данные Б.Г. Водопьянова и соавт. (2001 г.)². Морфометрические исследования проводили по рекомендациям Е.Н. Любченко и других исследователей (2019 г.)³. Извлечение, исследование и описание внутренних органов проводили согласно ГОСТ Р 57547-2017⁴.

При патологоанатомическом вскрытии для фиксации отдельно изучаемых явлений и предметов, получения наглядного материала проводили фотографирование с помощью фотоаппарата Alpha (Sony, Япония).

Гистологическое исследование биопсийного материала из внутренних органов проводили на кафедре инфекционных болезней факультета ветеринарной медицины и зоотехнологий ФГБОУ ВО «Пермский ГАТУ» по общепринятым методикам с окрашиванием гематоксилином и эозином, а также с применением дополнительной гистохимической окраски по методу Грама.

Гистологические препараты были переведены в цифровые. Диагностику патологий проводили с использованием программного обеспечения для просмотра микроскопических цифровых препаратов Vision® («Медика Продакт», Россия).

Для установления окончательного диагноза был собран анамнез, проанализированы результаты показателей крови, отобранной при жизни медведя, и инструментального исследования, проводимого во время болезни. Для анализа референсных значений (средние значения определенных лабораторных показателей, полученных в результате массовых обследований) использовали данные A.R. Græslî и других ученых (2014 г.) и С. Концевой с соавт. (2022 г.)⁵ [12].

Результаты и обсуждение / Results and discussion

По данным дрессировщика и ветеринарного врача, обслуживающих зоопарк, медведь по кличке Буча до 6-летнего возраста выступал в цирке, затем был передан в условия зоопарка, где до 2015 года содержался в передвижном вагоне с ограниченным для движения пространством. В 2015 году пережил сильный стресс в связи с наводнением и вместе с другими животными перевозился (дважды) на новые площадки зоопарка. Последние восемь лет содержался в вольере с бетонированным полом и деревянным лежаком. В полную спячку в зимний сезон не залегал, периодически просыпался, принимал корм и воду. Рацион медведя состоял из отварной морской рыбы, каши, овощей и фруктов. Соотношение ингредиентов менялось в зависимости от времени года. Животное в зоопарке было вакцинировано против бешенства. В зоопарке нет должности штатного ветеринарного врача, все мероприятия проводит специалист Государственной ветеринарной службы, имеющий опыт работы с дикими животными.

У медведя в возрасте 25 лет периодически наблюдали отсутствие аппетита, вялость, рвоту. Лечение проводилось симптоматическое. По информации ветеринарного врача, животное заболело в марте 2025 года с клиническими признаками желудочно-кишечного кровотечения. У медведя стали наблюдать спазмы в области живота, он катался по полу, переступал лапами, принимал позы дефекации, из анального отверстия выделялась кровь. При невозможности обездвижить и обследовать животное для лечения были назначены спазмолитики, обезболивающие, ферменты и энтеросорбенты (энтерол, кисели).

При повторном клиническом осмотре, проведенном после седации, у медведя были зарегистрированы локальные дермальные поражения и свищевые ходы в проекции бедренной мышцы правой тазовой конечности. Были проведены обработка и очистка данного участка, применена новокаиновая блокада с антибиотиком. Температура в момент обследования — 38,5 °C, пульс — 80, частота дыхания — 13 в минуту.

В ходе обследования были взяты образцы венозной крови и проведены исследования в Государственной ветеринарной лечебнице Уссурийского городского округа. Результаты общего клинического (гематологическим анализатором крови Mindray BC-30Vet) и биохимического (биохимическим экспресс-анализатором крови Pointcare V3) исследования крови медведя представлены в таблице 1.

² Водопьянов Б.Г., Саловаров В.О. Определение возраста и пола охотничьих зверей. Учебное пособие по биотехнии. Иркутск: Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. 2001; 45.

³ Любченко Е.Н., Короткова И.П., Иванчук Г.В., Кухаренко Н.С., Жилин Р.А., Кожушко А.А. Морфометрические исследования диких кошачьих Дальнего Востока. Учебное пособие. Уссурийск: Приморский государственный аграрно-технологический университет. 2019; 96.

⁴ ГОСТ Р 57547-2017

⁵ Концевая С. Организация ветеринарной работы с дикими животными. Учебное пособие. Изд-во ФГБОУ ДПО РАКО АПК. 2022. ISBN 978-5-93098-120-9.

Таблица 1. Результаты общего клинического и биохимического исследования крови медведя

Table 1. The results of a general clinical and biochemical study of bear blood

№	Параметры	Ед. изм.	Результат	Референсные значения
1	Эритроциты (RBC)	$\times 10^{12}/L$	5,74	6,7–7,5
2	Гемоглобин (HGB)	g/L	147	137–171
3	Гематокрит (HCT)	%	0,36	0,42–0,53
4	Средний объем эритроцитов (MCV)	fL	63,8	57–75
5	Средняя концентрация гемоглобина в эритроцитах (MCHC)	g/L	401	334–373
6	Содержание гемоглобина в эритроцитах (MCH)	Pg	25,6	22,0–24,6
7	Лейкоциты (WBC)	$\times 10^9/l$	9,0	3,9–11,5
8	Лимфоциты (LYM%)	%	5,4	
9	Моноциты (MON%)	%	0,9	0,8–11,3
10	Гранулоциты (GRA%)	%	93,7	
11	Тромбоциты (PLT)	$\times 10^3/UL$	508	103–811
12	Средний объем тромбоцитов (MPV)	fL	5,3	7–12
13	Общий белок (BELOK)	g/L	84,5	48–74
14	Альбумин (ALB)	g/L	41,5	24,0–40,6
15	Гамма-глутамилтрансфераза (GGT)	U/L	18	2,7–9,6
16	Аланинаминотрансфераза (ALT)	U/L	60	10–36
17	Аспартатаминотрансфераза (AST)	U/L	86	16–75
18	Щелочная фосфатаза (ALP)	U/L	31	10–75
19	Лактатдегидрогеназа (LDH)	U/L	862	378–700
20	Креатининкиназа (CK)	U/L	307	0–220
21	Амилаза (AMYL)	U/L	47	0–1400
22	Креатинин (CREA)	umol/L	1800	58,1–218
23	Мочевина (UREA)	mmol/L	36,7	0,5–11,9
24	Глюкоза (GLU)	mmol/L	8,72	3,60–10,5
25	Холестерин (CHOL)	mmol/L	8,76	4,5–12,3
26	Триглицериды (TRIG)	mol/L	5,73	1,3–5,0
27	Кальций общий (Ca)	mol/L	2,08	2,0–2,6
28	Фосфор неорганический (PHOS)	mol/L	5,50	1,5–2,0
29	Натрий (Na)	mol/L	119,2	134–153
30	Хлор (Cl)	mol/L	95,0	95–104

При анализе полученных результатов установлены снижение количества эритроцитов и уменьшение среднего объема тромбоцитов, наблюдаемое при повышенном количестве тромбоцитов. Из биохимических показателей повышенными были общий белок, альбумин, гамма-глутамилтрансфераза, аланин- и аспартатаминотрансфераза, лактатдегидрогеназа, креатининкиназа, триглицериды, креатинин, мочевина и неорганический фосфор, при этом наблюдалось снижение содержания натрия и хлора.

Согласно данным анамнеза, предоставленным лечащим ветеринарным врачом, при повторной иммобилизации, проведенной спустя пять дней, медведю было выполнено рентгенографическое исследование грудной и брюшной полости, в результате которого диагностированы гепатомегалия (увеличение размеров печени) и наличие конкрементов в просвете желчного пузыря. При фиброгастродуоденоскопии (ФГДС) визуализированы очаговые эрозивно-язвенные поражения слизистой оболочки желудка и двенадцатиперстной кишки, соответствующие картине гастроэзофагеальной рефлюксной болезни.

В рамках назначенной терапии применялся комплекс препаратов различного действия: гепатопротекторы «Эссенциале форте» (в капсулированной форме), ферментные препараты и энтеросорбенты («Энтерол», «Эрмитель», кисели на основе сорбентов), спазмолитики и анальгетики «Тримедат», «Дюспаталин», поливитаминный комплекс «Нейромультивит», противомикробное и противопаразитарное средство «Фуразолидон», инфузионная терапия (0,9%-ный раствор натрия хлорида и аскорбиновая кислота).

Основную сложность в проведении терапии представлял отказ животного от добровольного приема лекарственных средств, в том числе при их сокрытии в аппетитных кормовых компонентах. На фоне проводимого лечения отмечалась нестабильная динамика: периоды субъективного улучшения общего состояния сменялись эпизодами диспепсических расстройств, включавших рвоту после приема корма, метеоризм и диарея.

Через 45 суток наступила смерть животного. Труп медведя был направлен для патологоанатомического исследования и установления причины смерти с предположительным прижизненным диагнозом «панкреатит, гепатоз, гастроэзофагеальная рефлюксная болезнь (ГЭРБ)».

При наружном осмотре установлено: вид животного — бурый медведь (*Ursus arctos*), самец, возраст 25 лет, вес — примерно 200 кг. Нижний правый клык отсутствует, нижний левый клык обломан на $\frac{1}{2}$ высоты, верхний правый клык обломан, верхний левый клык обломан частично (на 1,5 см). Шерсть желто-коричневого цвета, густая, подшерсток слабо выражен, в грудной части туловища шерсть имеет светло-желтый цвет. На латеральной поверхности в области правой бедренной мышцы и в области седалищного бугра имелись участки, лишенные шерстного покрова, с дефектом кожи и отсутствием эпидермиса, при надавливании выделялась жидкость красно-зеленого цвета вязкой консистенции.

Описание патологоанатомической картины. Общий вид и состояние тканей: подкожная жировая клетчатка хорошо развита, представлена жировой тканью беловато-желтого цвета, мягкой мажущей консистенции. Скелетная мускулатура темно-красного цвета, имеет выраженное крупноволокнистое строение. Видимые слизистые оболочки (конъюнктивы, ротовой полости)

бледно-розового цвета. Отмечено истечение жидкости черного цвета из анального отверстия.

При патологоанатомическом исследовании было выявлено наличие глубокого обширного гнойного абсцесса в данной анатомической области. Наиболее вероятной этиологией формирования абсцесса считается ятрогенное осложнение — внутримышечное введение препаратов анальгезирующего или спазмолитического действия, выполненное на предыдущих этапах терапии. Данное предположение основывается на выявлении прямой корреляции локализации патологического очага с типичными местами проведения инъекций.

Топография внутренних органов: положение органов в грудной и брюшной полостях анатомически правильное, смещений и аномалий расположения не выявлено. Целостность серозных покровов и паренхимы внутренних органов не нарушена.

Сердечно-сосудистая система: при осмотре сердца выявлены признаки острого расширения камер сердца (рис. 1А), отмечены признаки миокардиальной дистрофии (миокард дряблой консистенции, окраска соответствует описанию «цвета вареного мяса» — бледно-серовато-красная, тусклая). Отношение толщины стенки левого желудочка к толщине стенки правого желудочка — 5:1, что соответствует физиологической норме для данного вида животных и не свидетельствует о гипертрофии миокарда (рис. 1Б).

В просвете трахеи содержалась пенная жидкость красного цвета. Краниальная и каудальная доли левого легкого, краниальная, каудальная и добавочная доли правого легкого темно-красного цвета и мягкой консистенции, из разреза выделялась пенная жидкость темно-красного цвета (рис. 2А). Правая средняя доля легкого серо-коричневого цвета и плотной консистенции, на разрезе поверхность сухая, из разреза выделялись фибрин и вязкая серо-желтая жидкость (рис. 2Б).

Печень увеличена, желто-коричневого цвета, плотной консистенции, края разреза сухие, сосуды и желчные ходы не просматриваются (рис. 3А). Желчный пузырь увеличен, стенка плотная, содержимое — вязкая жидкость ярко-желтого цвета и множественные образования черного цвета различного размера твердой консистенции — 0,5 × 0,5 см и меньше (рис. 3Б).

Селезенка с закругленными краями, темно-красного цвета, пульпа на разрезе сухая.

Почки множественные, красно-серого цвета с легкой желтизной. Границы

между корковым и мозговым слоями сглажены, в корковом слое имеются участки красного цвета. Под капсулой почек множественные кисты размером от 0,2 до 0,5 см. Мочевой пузырь наполнен мутной жидкостью (мочой) желтого цвета. Надпочечники увеличены, плотной консистенции.

Поджелудочная железа увеличена, края закруглены, плотной консистенции, в области тела имеются участки темно-красного цвета.

Желудок с незначительным вязким содержимым серого цвета. На слизистой оболочке имеются участки темно-красного цвета. Слизистая оболочка двенадцатиперстной кишки серо-желтого цвета, с вязким содержимым серо-желтого цвета, на слизистой оболочке имеются участки темно-красного цвета. Содержимое толстого отдела кишечника от темно-коричневого цвета до черного, на слизистой оболочке имеются участки темно-красного цвета (рис. 4).

Рис. 1. А) Острое расширение сердца. Б) Миокардоз (фото авторов)
Fig. 1. A) Acute cardiac dilation. B) Myocardosis (photos of the authors)

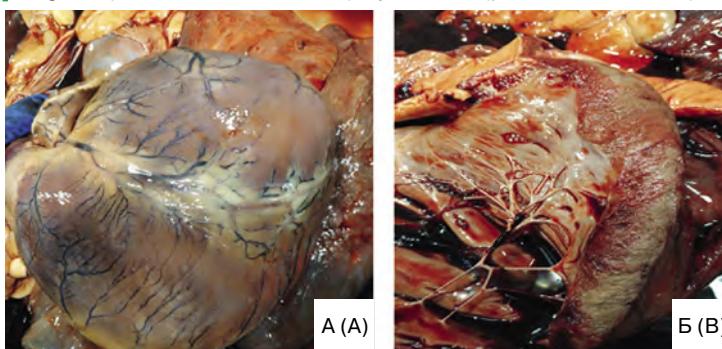


Рис. 2. А) Отек и гиперемия левого легкого; Б) Крупозное воспаление средней доли правого легкого. Фото авторов

Рис. 2. A) Edema and hyperemia of the left lung; B) Croup inflammation of the middle lobe of the right lung. Photos of the authors

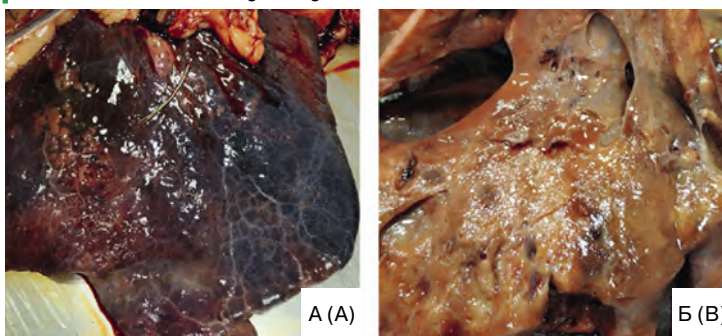


Рис. 3. А) Перерождение печени; Б) Конкременты в желчном пузыре медведя. Фото авторов

Fig. 3. A) Degeneration of the liver; B) Nodules in the bear's gallbladder. Photos of the authors

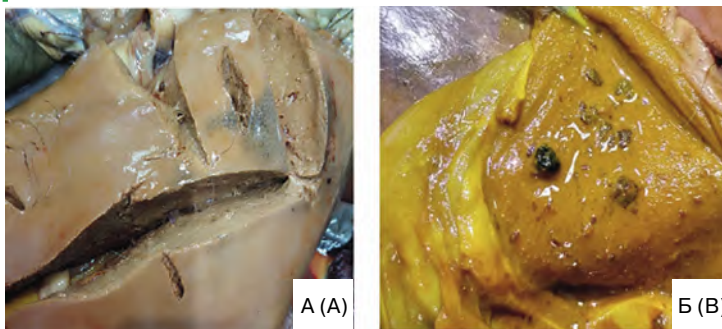


Рис. 4. Участки геморрагического воспаления слизистой оболочки желудка медведя. Фото авторов

Fig. 4. Areas of hemorrhagic inflammation of the bear's gastric mucosa. Photos of the authors

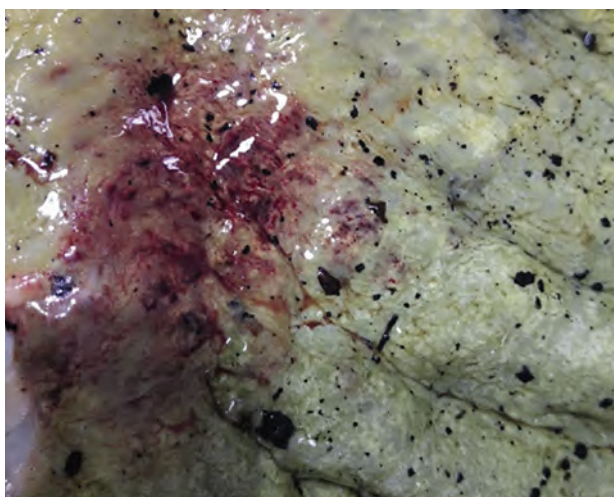
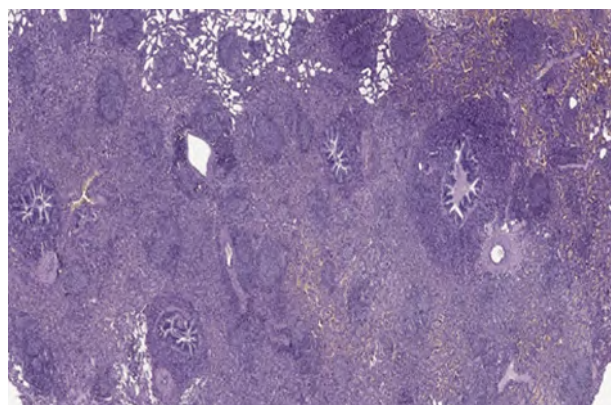


Рис. 5. Микропрепарат ткани средней правой доли легкого: мультифокальная пиогранулематозная пневмония с венозным застоем и альвеолярным отеком (гематоксилин и эозин, x50). Фото авторов

Fig. 5. Micropreparation of the tissue of the middle right lobe of the lung: multifocal pyogranulomatous pneumonia with venous congestion and alveolar edema (hematoxylin and eosin, x50). Photos of the authors



По результатам патологоанатомического вскрытия установлены патологоанатомические диагнозы: отек и гиперемия левого легкого; фибринозная пневмония средней доли правого легкого; миокардоз; жировая дистрофия печени; желчекаменная болезнь; поликистоз почек; геморрагический гломерулонефрит; очаговый геморрагический гастродуоденит; очаговый геморрагический проктит; гиперплазия надпочечников; гиперплазия селезенки.

По результатам гистологического исследования, для которого были отобраны фрагменты сердечной мышцы, почки, печени, легкого, поджелудочной железы, установлены следующие гистологические диагнозы.

Гистологическая картина предоставленных фрагментов ткани легких характерна для мультифокальной пиогранулематозной пневмонии с венозным застоем и альвеолярным отеком. Воздушность легочной ткани резко снижена за счет выраженной воспалительной (преимущественно нейтрофильной и в меньшей степени лимфоцитарной) инфильтрацией диффузно-очагового характера, сопутствующей реактивной фиброплазией и множественными скоплениями эпителиоидных макрофагов (в том числе с центральным некрозом) (рис. 5).

Наблюдается интерстициальный и альвеолярный фиброз, просветы бронхиол зачастую спавшиеся. Отдельные фрагменты ткани легкого с диффузным венозно-капиллярным полнокровием, участками ателектазов. Альвеолы заполнены эозинофильным гомогенным материалом. Наиболее вероятна инфекционная этиология патологического процесса. Дифференциальными диагнозами могут быть «туберкулез», «микоз легких», «бактериальная пневмония».

Гистологическая картина дистрофии миокарда с диффузным интерстициальным отеком, очаговым липоматозом миокарда. Тотально просматривается неравномерная окраска кардиомиоцитов.

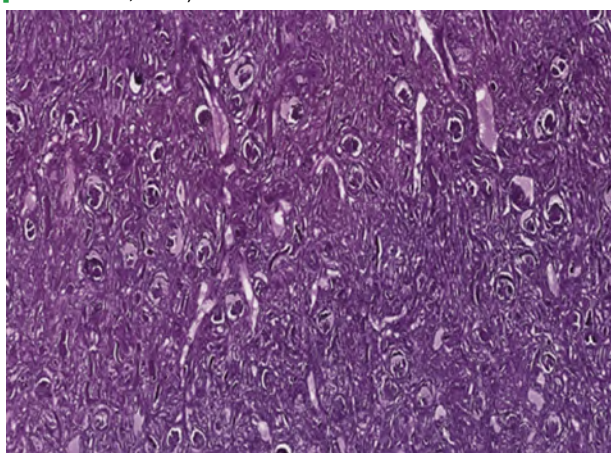
Определяются группы кардиомиоцитов в состоянии умеренной гипертрофии, мультифокально определяются пучки мышечных волокон, истонченных за счет атрофии. Вокруг кровеносных сосудов умеренный липоматоз и периваскулярный отек. В одном из полей зрения определяется волнообразная деформация мышечных волокон миокарда (наиболее вероятно в результате нарушения ритма сердца).

Почки: дистрофия подоцитов, белковые цилиндры в просветах собирательных протоков, признаки гломерулопатии с протеинурией, тубулопатии. Простые кисты почки. Морфологические данные указывают на гломерулопатию и тубулопатию. В некоторых препаратах, в корковом слое просматриваются мелкие кисты, просвет которых оптически пустой (рис. 6).

При исследовании микропрепаратов биоптатов печени установлены очаговый микровезикулярный гепатоцеллюлярный стеатоз (липидоз), диффузный внутрипеченочный холестаз, локальные

Рис. 6. Микропрепарат ткани коркового слоя почки: гломерулопатия с протеинурией, тубулопатия. (гематоксилин и эозин, x400). Фото авторов

Fig. 6. Micropreparation of the kidney cortical layer tissue: glomerulopathy with proteinuria, tubulopathy (hematoxylin and eosin stain, x400). Photos of the authors



участки с морфологическими признаками, более вероятными для вакуолярной гепатопатии с идентичными патологическими изменениями (рис. 7).

Гистологическая картина предоставленного микропрепарата лимфатического узла наиболее вероятна для кортикальной гиперплазии (иммунный ответ). Весь корковый слой заполнен мноморфными мелкими лимфоцитами. Гистологическая картина представленных микропрепаратов имеет картину хронического, язвенного, высокоактивного, выраженного гастрита фундального и антрального отделов желудка. Нельзя достоверно исключить инфекционную этиологию. Фовеолярный эпителий либо отсутствует, либо просматривается фрагментами. Мультифокально выявлены язвенные поражения слизистой желудка без признаков грануляции. Собственная пластинка отечная, с признаками фиброза. Воспалительный инфильтрат выраженный, лимфоплазмоцитарный (преобладание лимфоцитов), в отдельных полях зрения просматриваются мелкие нейтрофильные

скопления по типу микроабсцессов, единичные участки скопления макрофагов (рис. 8).

Гистологическая картина надпочечника характерна для очаговой кортикальной гиперплазии. В клубочковой зоне просматриваются поля крупных клеток с макровезикулярной просветленной цитоплазмой и мелким гиперхромным ядром. Клетки не проявляют анизоцитоза и ядерного плеоморфизма. В пучковой зоне просматриваются поля укрупненных клеток с микровезикулярной базофильной цитоплазмой и мелким гипохромным ядром, клетки не проявляют анизоцитоза и ядерного плеоморфизма (рис. 9).

Для дифференциальной диагностики септического процесса была проведена дополнительная окраска ткани легкого и миокарда по методу Грама. В результате исследования в паренхиме легких и микропрепаратах миокарда выявлены крупные очаги скопления палочковидных, грамположительных бактерий, которые выявлены и в крупных кровеносных сосудах легких (рис. 10, 11).

Рис. 7. Микропрепарат ткани печени: очаговый микровезикулярный гепатоцеллюлярный стеатоз (липидоз) (гематоксилин и эозин, $\times 400$). Фото авторов

Fig. 7. Micro-preparation of liver tissue: liver tissue: focal microvesicular hepatocellular steatosis (lipidosis) (hematoxylin and eosin, $\times 400$). Photos of the authors

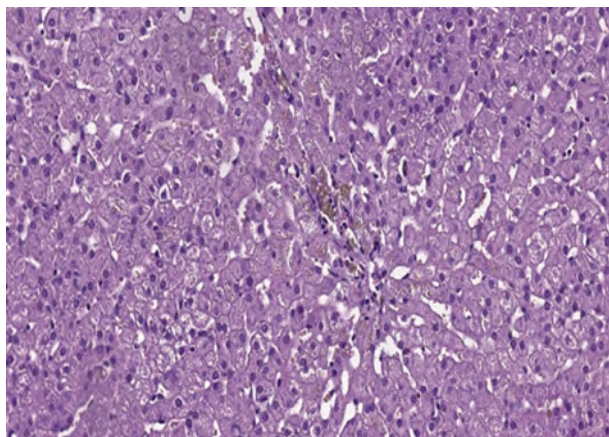


Рис. 8. Микропрепарат ткани стенки желудка: хронический, язвенный, высокоактивный, выраженный гастрит (гематоксилин и эозин, $\times 200$). Фото авторов

Fig. 8. Micro-preparation of stomach wall tissue: chronic, ulcerative, highly active, marked gastritis (H&E, $\times 200$). Photos of the authors

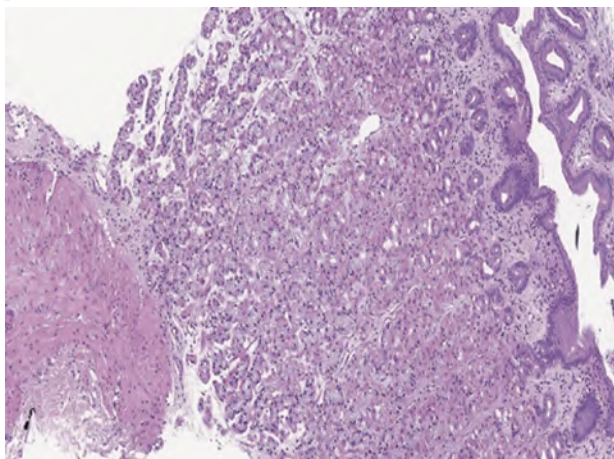


Рис. 9. Микропрепарат ткани коры надпочечника: очаговая кортикальная гиперплазия (гематоксилин и эозин, $\times 200$). Фото авторов

Fig. 9. Micropreparation of adrenal cortex tissue: adrenal gland. Focal cortical hyperplasia (hematoxylin and eosin, $\times 200$). Photos of the authors

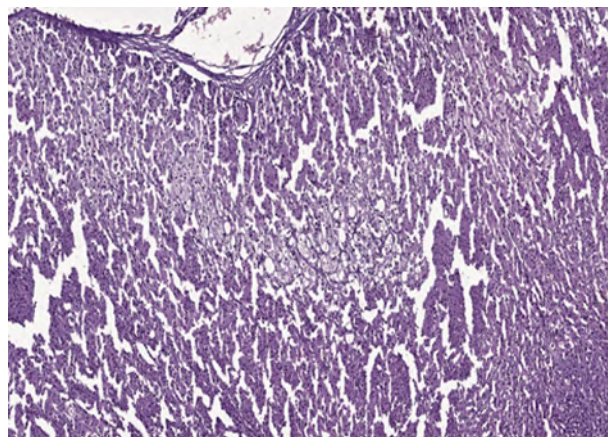


Рис. 10. Микропрепарат ткани легкого бурого медведя ($\times 1000$), окраска по Граму. Фото авторов

Fig. 10. Microscopic preparation of light tissue of brown bear ($\times 1000$), Gram staining. Photos of the authors

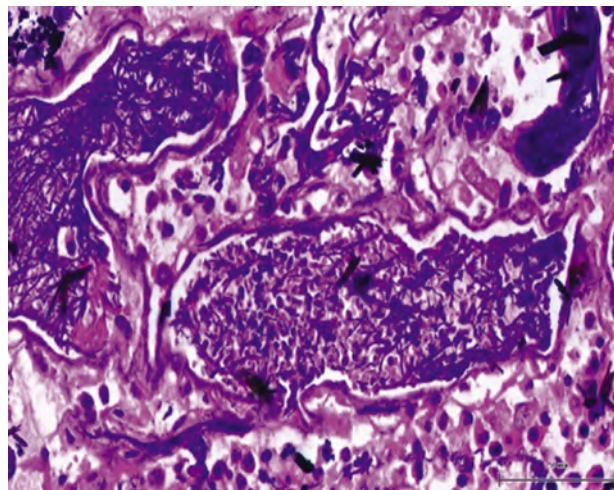


Рис. 11. Микропрепарат сосуда сердца бурого медведя (x1000), окраска по Граму. Фото авторов

Fig. 11. Microscopic preparation of cardiac vessels of *Ursus arctos* (x1000), Gram staining. Photos of the authors

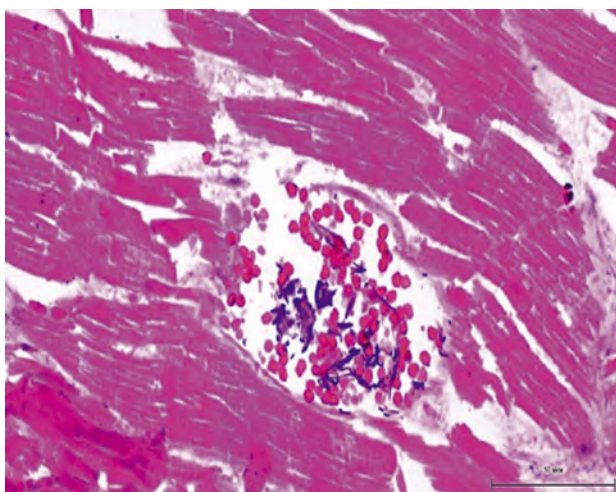
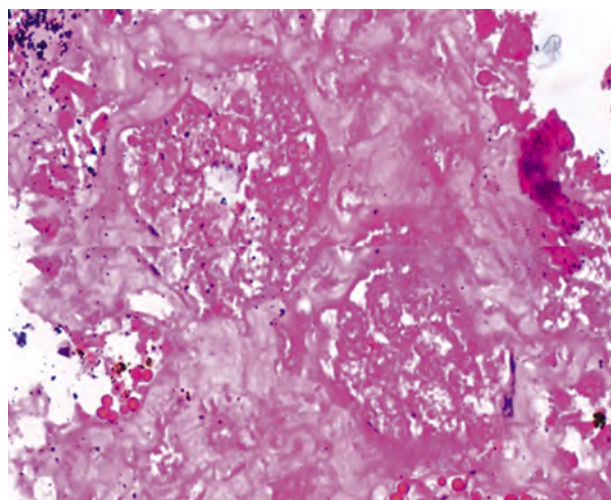


Рис. 12. Микропрепарат ткани мозгового слоя почки (x1000), окраска по Граму. Фото авторов

Fig. 12. Microscopic preparation of brown bear kidney medulla tissue (x1000), Gram stain. Photos of the authors



При дополнительной окраске препаратов почки и печени по методу Грама выделяются некротизированные клубочки, что является одним из признаков сепсиса, а в мелких сосудах печени определены единичные палочковидные грамположительные бактерии (рис. 12).

На основании протокола вскрытия животного и гистологического исследования органов смерть животного наступила в результате полиорганной недостаточности на фоне генерализованного воспалительного процесса (наиболее вероятно — инфекционной этиологии) с формированием хронической язвы желудка и пиогранулематозной пневмонии. Сопутствующие и отягощающие диагнозы, которые усугубили течение заболевания: хроническая почечная недостаточность, липидоз печени с вероятной вакуолярной гепатопатией на фоне очаговой кортикальной гиперплазии надпочечника, развившейся на фоне стресса в условиях неволи.

Min-Goo Seo и другие ученые в своей публикации изложили историю болезни с патологоанатомическими и гистопатологическими изменениями в органах и тканях, связанных с септическим процессом у евразийского бурого медведя, который большую часть жизни содержался в зоопарке в неволе, предполагая, что стресс в неволе мог быть предрасполагающей причиной развития инфекции [13].

О негативном влиянии стресса у зоопарковых и диких животных сообщают L. Natarsha Babic и другие исследователи [14], J. Föllmi и соавт. [15].

Выводы авторов согласовываются с предположениями цитируемых авторов о негативном влиянии стресса на организм животного в неволе как фактора, способствующего развитию генерализованного процесса.

Установленные патологоанатомические диагнозы подтверждены биохимическим анализом

крови. Отмечали повышение печеночных проб: гамма-глутамилтрансферазы, аланин- и аспаратаминотрансферазы, лактатдегидрогеназы, креатининкиназы, триглицеридов.

Геморрагический гломерулонефрит и поликистоз сопровождалось повышением биохимических показателей крови медведя, таких как креатинин, мочевины и неорганический фосфор. На микропрепарате обнаружены белковые цилиндры в просветах собирательных протоков почек, дистрофия подоцитов, тубулопатия и гломерулопатия с протеинурией.

Полученные данные совпадают с результатами исследований М.К. Vando (2019) о связи повышенной концентрации триглицеридов в сыворотке крови с накоплением липидов в печени, почках, миокарде и скелетных мышцах, что указывает на нарушение функции этих органов, а также с мнением Я.А. Лоуренс (2017 г.) о том, что повышение уровня аланинаминотрансферазы в сыворотке крови может наблюдаться при внепеченочных заболеваниях, таких как травмы мышц, перитонит, сепсис и хронические воспаления, применении антибиотиков. При этом гамма-глутамилтрансфераза является более чувствительным индикатором заболеваний гепатобилиарной системы, чем щелочная фосфатаза⁶ [16, 17]. Повышение уровня аланинаминотрансферазы и аспаратаминотрансферазы в сыворотке крови может наблюдаться и при внепеченочных заболеваниях, таких как травмы мышц, перитонит, сепсис и хронические воспаления, которые часто встречаются у медведей [18]. Данная информация соотносится с результатами настоящих исследований. У медведя при травме в области бедренной мышцы, сепсисе и гепатозе отмечалось повышение уровня аланин- и аспаратаминотрансферазы в сыворотке крови.

⁶ Гиперлипемия и печеночный липидоз у крупных животных.

URL: <https://www.merckvetmanual.com/digestive-system/hepatic-disease-in-large-animals/hyperlipemia-and-hepatic-lipidosis-in-large-animals>

Низкое качество корма или снижение его потребления, особенно в период высокой потребности в энергии, в том числе при системном заболевании, может привести к гиперлипемии (высокому содержанию холестерина и триглицеридов в крови), при котором возникают рвота, диарея, снижение аппетита, потенциально панкреатит [19]. Данные симптомы наблюдались у медведя при жизни, а поражение гепатобиллиарной системы подтверждено гистологическим исследованием, при котором установлены очаговый микровезикулярный гепатоцеллюлярный стеатоз, диффузный внутрипеченочный холестаз, вероятный для вакулярной гепатопатии.

По данным Б.П. Шевченко (2003 г.), к концу зимней спячки у медведя возрастает количество общего белка и альбуминов, но уменьшается количество эритроцитов, лейкоцитов и гемоглобина, отношение кальция к фосфору почти не меняется⁷. В то же время объяснить изменения в составе белков сыворотки крови сложно из-за конкурирующих факторов, повышающих или понижающих концентрацию альбумина и глобулина в сыворотке крови животного.

Выводы/Conclusions

На основании полученных результатов было установлено, что непосредственной причиной летального исхода животного явилась полиорганная недостаточность (ПОН), развившаяся на фоне сепсиса — генерализованной бактериальной инфекции, сопровождавшейся синдромом системной воспалительной реакции (СВР). Ведущими компонентами ПОН выступили острая почечная и дыхательная недостаточность, которые закономерно привели к декомпенсации сердечной деятельности, вероятно, в форме фатальной аритмии (фибрилляции желудочков и (или) предсердий).

Ключевой патогенетический фактор: патогенез сепсиса был обусловлен выраженной иммуносупрессией. Ее причиной является эндогенный

гиперадренокортицизм, подтвержденный морфологически (кортикальная гиперплазия надпочечников и характерные изменения печени). Хроническое избыточное выделение кортизола привело к стойкому угнетению клеточного и гуморального иммунитета, резко повысив восприимчивость организма к бактериальной инвазии.

Этиологический контекст: формирование эндокринной дисфункции, вероятно, носит мультифакториальный характер и связано с длительным содержанием в условиях неволи.

Ключевую роль сыграло хроническое воздействие стрессоров (транспортировка, иммобилизация, экстремальные события типа наводнения), которые привели к нарушению гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой регуляции и развитию функциональной гиперплазии коры надпочечников.

Научно-практическая значимость: представленный клинико-морфологический анализ демонстрирует комплексный алгоритм диагностики сложной полиорганной патологии у диких животных в условиях неволи и раскрывает ключевое звено ее патогенеза — стресс-индуцированный гиперадренокортицизм как причина фатального сепсиса.

Полученные в ходе исследований результаты можно рассматривать для использования диагностики прижизненной оценки и посмертных патологоанатомических исследований у животных, содержащихся в неволе.

Данное описание служит основой для формирования новых гипотез и стимулирует дальнейшие исследования в области профилактики стрессовых состояний и эндокринных нарушений у животных, содержащихся в зоопарках.

Материалы случая могут быть использованы в учебном процессе и для совершенствования клинических протоколов, подчеркивая необходимость мониторинга стресс-факторов и иммунного статуса у подобных пациентов.

⁷ Шевченко Б.П. Анатомия бурого медведя. Оренбург: Оренбургский ГАУ. 2003; 454.

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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают огромную благодарность ветеринарному врачу Д.В. Замарацкому и дрессировщику медведей В.И. Блищ за взаимодействие и предоставление информации по анамнезу и лечению бурого медведя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Robbins C.T. *et al.* Ursids evolved early and continuously to be low-protein macronutrient omnivores. *Scientific Reports*. 2022; 12: 15251. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19742-z>
2. Arnhold W., Schrauzer G.N., Heuschele W.P. Possible dietary influence on hepatobiliary cancer in sloth bears (*Melursus ursinus*). *Proceedings of the first annual Conference of the Nutrition Advisory Group (NAG) of the American Zoo & Aquarium Association (AZA)*. 1995.

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.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their sincere gratitude to veterinarian D.V. Zamaratsky and bear trainer V.I. Blishch for their collaboration and for providing information on the history and treatment of the brown bear.

REFERENCES

1. Robbins C.T. *et al.* Ursids evolved early and continuously to be low-protein macronutrient omnivores. *Scientific Reports*. 2022; 12: 15251. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19742-z>
2. Arnhold W., Schrauzer G.N., Heuschele W.P. Possible dietary influence on hepatobiliary cancer in sloth bears (*Melursus ursinus*). *Proceedings of the first annual Conference of the Nutrition Advisory Group (NAG) of the American Zoo & Aquarium Association (AZA)*. 1995.

3. Rode K.D., Robbins C.T., Stricker C.A., Taras B.D., Tollefson T.N. Energetic and health effects of protein overconsumption constrain dietary adaptation in an apex predator. *Scientific Reports*. 2021; 11: 15309. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94917-8>
4. Maślak R., Sergiel A., Bowles D., Paśko Ł. The Welfare of Bears in Zoos: A Case Study of Poland. *Journal of Applied Animal Welfare Science*. 2016; 19(1): 24–36. <https://doi.org/10.1080/10888705.2015.1071671>
5. Collins D.M. Ursidaey. Miller R.E., Fowler M.E. (eds.). *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine*. St. Louis, Missouri: Elsevier; Saunders. 2015; 8: 498–508. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7397-8.00050-5>
6. Stagni E., Sequeira S., Brscic M., Redtenbacher I., Hartmann S. A retrospective study on the prevalence of main clinical findings in brown bears (*Ursus arctos*) rescued from substandard husbandry conditions. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1299029. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1299029>
7. Сивкова Т.Н., Волков С.В., Бессонова Е.М., Шкарина В.М. Случаи острого клостридиоза у гималайского медведя в неволе. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2022; 250: 214–220. https://doi.org/10.31588/2413_4201_1883_2_250_214
8. Balseiro A. et al. New threats in the recovery of large carnivores inhabiting human-modified landscapes: the case of the Cantabrian brown bear (*Ursus arctos*). *Veterinary Research*. 2024; 55: 24. <https://doi.org/10.1186/s13567-024-01279-w>
9. Barnes D.M., Rogers L.L. Clostridial myonecrosis in a black bear associated with drug administration. *Journal of Wildlife Diseases*. 1980; 16(3): 315–317. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-16.3.315>
10. Balseiro A. et al. *Clostridium sordellii* in a Brown Bear (*Ursus arctos*) from Spain. *Journal of Wildlife Diseases*. 2013; 49(4): 1047–1051. <https://doi.org/10.7589/2013-03-065>
11. Galateanu G., Göritz F., Saragusty J., Szentiks C.A., Wibbelt G., Hildebrandt T.B. Bear watching for foot and spine osteopathology correlation in captive bears (*Ursidae*). *Proceedings of the International Conference on Diseases of Zoo and Wild Animals*. 2014; 122–125.
12. Græslı A.R., Fahlman Å., Evans A.L., Bertelsen M.F., Arnemo J.M., Nielsen S.S. Haematological and biochemical reference intervals for free-ranging brown bears (*Ursus arctos*) in Sweden. *BMC Veterinary Research*. 2014; 10: 183. <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0183-x>
13. Seo M.-G., Eo K.-Y., Kwak D., Kim K.-T. Bacterial Sepsis Associated with a Captive State Caused by *Edwardsiella tarda* in a Eurasian Brown Bear (*Ursus arctos arctos*). *Journal of Veterinary Clinics*. 2023; 40(1): 78–82. <https://doi.org/10.17555/jvc.2023.40.1.78>
14. Babic N.L., Johnstone C.P., Reljić S., Sergiel A., Huber D., Reina R.D. Evaluation of physiological stress in free-ranging bears: current knowledge and future directions. *Biological Reviews*. 2023; 98(1): 168–190. <https://doi.org/10.1111/brv.12902>
15. Föllmi J. et al. A scoring system to evaluate physical condition and quality of life in geriatric zoo mammals. *Animal Welfare*. 2007; 16(3): 309–318. <https://doi.org/10.1017/S0962728600027123>
16. Bando M.K.H. et al. Metabolic derangements and reduced survival of bile-extracted Asiatic black bears (*Ursus thibetanus*). *BMC Veterinary Research*. 2019; 15: 263. <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2006-6>
17. Lawrence Y.A., Steiner J.M. Laboratory Evaluation of the Liver. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*. 2017; 47(3): 539–553. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2016.11.005>
18. Bourne D.C., Cracknell J.M., Bacon H.J. Veterinary issues related to bears (*Ursidae*). *International Zoo Yearbook*. 2010; 44: 16–32. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1090.2009.00097.x>
19. Pearson A.M., Halloran D.W. Hematology of the brown bear (*Ursus arctos*) from southwestern Yukon Territory, Canada. *Canadian Journal of Zoology*. 1972; 50(3): 279–286. <https://doi.org/10.1139/z72-038>
3. Rode K.D., Robbins C.T., Stricker C.A., Taras B.D., Tollefson T.N. Energetic and health effects of protein overconsumption constrain dietary adaptation in an apex predator. *Scientific Reports*. 2021; 11: 15309. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94917-8>
4. Maślak R., Sergiel A., Bowles D., Paśko Ł. The Welfare of Bears in Zoos: A Case Study of Poland. *Journal of Applied Animal Welfare Science*. 2016; 19(1): 24–36. <https://doi.org/10.1080/10888705.2015.1071671>
5. Collins D.M. Ursidaey. Miller R.E., Fowler M.E. (eds.). *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine*. St. Louis, Missouri: Elsevier; Saunders. 2015; 8: 498–508. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7397-8.00050-5>
6. Stagni E., Sequeira S., Brscic M., Redtenbacher I., Hartmann S. A retrospective study on the prevalence of main clinical findings in brown bears (*Ursus arctos*) rescued from substandard husbandry conditions. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1299029. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1299029>
7. Sivkova T.N., Volkov S.V., Bessonova E.M., Shkarina V.M. The case of acute clostridial infection in Asian black bear in captive. *Scientific notes Kazan Bauman state academy of veterinary medicine*. 2022; 250: 214–220 (in Russian). https://doi.org/10.31588/2413_4201_1883_2_250_214
8. Balseiro A. et al. New threats in the recovery of large carnivores inhabiting human-modified landscapes: the case of the Cantabrian brown bear (*Ursus arctos*). *Veterinary Research*. 2024; 55: 24. <https://doi.org/10.1186/s13567-024-01279-w>
9. Barnes D.M., Rogers L.L. Clostridial myonecrosis in a black bear associated with drug administration. *Journal of Wildlife Diseases*. 1980; 16(3): 315–317. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-16.3.315>
10. Balseiro A. et al. *Clostridium sordellii* in a Brown Bear (*Ursus arctos*) from Spain. *Journal of Wildlife Diseases*. 2013; 49(4): 1047–1051. <https://doi.org/10.7589/2013-03-065>
11. Galateanu G., Göritz F., Saragusty J., Szentiks C.A., Wibbelt G., Hildebrandt T.B. Bear watching for foot and spine osteopathology correlation in captive bears (*Ursidae*). *Proceedings of the International Conference on Diseases of Zoo and Wild Animals*. 2014; 122–125.
12. Græslı A.R., Fahlman Å., Evans A.L., Bertelsen M.F., Arnemo J.M., Nielsen S.S. Haematological and biochemical reference intervals for free-ranging brown bears (*Ursus arctos*) in Sweden. *BMC Veterinary Research*. 2014; 10: 183. <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0183-x>
13. Seo M.-G., Eo K.-Y., Kwak D., Kim K.-T. Bacterial Sepsis Associated with a Captive State Caused by *Edwardsiella tarda* in a Eurasian Brown Bear (*Ursus arctos arctos*). *Journal of Veterinary Clinics*. 2023; 40(1): 78–82. <https://doi.org/10.17555/jvc.2023.40.1.78>
14. Babic N.L., Johnstone C.P., Reljić S., Sergiel A., Huber D., Reina R.D. Evaluation of physiological stress in free-ranging bears: current knowledge and future directions. *Biological Reviews*. 2023; 98(1): 168–190. <https://doi.org/10.1111/brv.12902>
15. Föllmi J. et al. A scoring system to evaluate physical condition and quality of life in geriatric zoo mammals. *Animal Welfare*. 2007; 16(3): 309–318. <https://doi.org/10.1017/S0962728600027123>
16. Bando M.K.H. et al. Metabolic derangements and reduced survival of bile-extracted Asiatic black bears (*Ursus thibetanus*). *BMC Veterinary Research*. 2019; 15: 263. <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2006-6>
17. Lawrence Y.A., Steiner J.M. Laboratory Evaluation of the Liver. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*. 2017; 47(3): 539–553. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2016.11.005>
18. Bourne D.C., Cracknell J.M., Bacon H.J. Veterinary issues related to bears (*Ursidae*). *International Zoo Yearbook*. 2010; 44: 16–32. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1090.2009.00097.x>
19. Pearson A.M., Halloran D.W. Hematology of the brown bear (*Ursus arctos*) from southwestern Yukon Territory, Canada. *Canadian Journal of Zoology*. 1972; 50(3): 279–286. <https://doi.org/10.1139/z72-038>

ОБ АВТОРАХ

Елена Николаевна Любченко¹

кандидат ветеринарных наук, доцент
LyubchenkoL@mail
<https://orcid.org/0000-0002-9441-8250>

Сергей Вячеславович Волков²

кандидат ветеринарных наук, доцент
volkov_sw@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7139-927X>

¹Приморский государственный аграрно-технологический университет,
ул. Блюхера, 44, Уссурийск, 692510, Приморский край, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д.Н. Прянишникова,
ул. Петропавловская, 23Д, Пермь, 614000, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Elena Nikolaevna Lyubchenko¹

Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor
LyubchenkoL@mail
<https://orcid.org/0000-0002-9441-8250>

Sergey Vyacheslavovich Volkov²

Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor
volkov_sw@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7139-927X>

¹Primorsky State Agrarian-Technological University,
44 Blucher St., Ussuriysk, 692510, Primorsky Krai, Russia

²Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov,
23d Petropavlovskaya St., Perm, 614000, Russia



ВЕТЕРИНАРИЯ
В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ
КОМПЛЕКСЕ

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



УДК 630.22/.28:612.35

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-19-30

И.В. Миронова^{1,2} ✉Р.М. Хабибуллин¹И.М. Хабибуллин¹¹ Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

✉ mironova_irina-v@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.12.2025

Одобрена после рецензирования: 11.12.2025

Принята к публикации: 26.01.2026

© Миронова И.В., Хабибуллин Р.М., Хабибуллин И.М.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-19-30

Irina V. Mironova^{1,2} ✉Ruzel M. Khabibullin¹Ilmir M. Khabibullin¹¹ Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia² Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

✉ mironova_irina-v@mail.ru

Received by the editorial office: 05.12.2025

Accepted in revised: 11.12.2025

Accepted for publication: 26.01.2026

© Mironova I.V., Khabibullin R.M., Khabibullin I.M.

Морфологические изменения в мышечной ткани бычков после применения апиадаптогена

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В работе представлены результаты исследования влияния апиадаптогена на продуктивные качества бычков бестужевской породы и морфологические изменения в мышечной ткани.

Методы. Бычкам в состав основного рациона вводили в виде настойки гомогенат трутневого расплода из расчета: для II (опытной) группы 0,005 мл, III (опытной) группы — 0,01 мл и IV (опытной) группы — 0,015 мл на 1 кг массы тела животного, I группа — контрольная. Эффективность использования тестируемого компонента определяли по комплексу прижизненных показателей, таким как живая масса, среднесуточный прирост, убойные показатели, химический состав, биологическая ценность мякоти туши и жира-сырца и морфологические изменения в мышечной ткани.

Результаты. Изменение живой массы свидетельствует, что в 18-месячном возрасте молодняк III (опытной) группы превосходил всех своих сверстников: I (контрольной) группы — на 22,1 кг, II (опытной) — на 9,5 кг и IV (опытной) группы — на 1,7 кг, по абсолютному приросту живой массы за весь период опыта — на 22,1 кг; 9,4 и 1,8 кг, соответственно. Во все возрастные периоды среди молодняка опытных групп более высокий среднесуточный прирост демонстрировали бычки бестужевской породы III (опытной) группы, составив от 696,70 до 797,80 г. Убойные качества и химический состав длиннейшей мышцы спины были лучше у животных III (опытной) группы, в рацион которых включали гомогенат трутневого расплода в дозе 0,01 мл/кг массы тела.

Гистологические исследования мышечной ткани бычков, которым включали в рацион гомогенат трутневого расплода показали, что структура мышечной ткани соответствовала норме, в то время как у животных контрольной группы были обнаружены некоторые признаки дистрофических изменений, выражающиеся в нарушениях белкового и углеводного обменов, и слабо выраженного жирового обмена в тканях.

Таким образом, комплексный анализ свидетельствует о благоприятном влиянии гомогената трутневого расплода, который проявил себя как адаптоген с лучшим эффектом в дозировке 0,01 мл на 1 кг живой массы животного, которую вводили в рацион бычков III (опытной) группы.

Ключевые слова: апиадаптоген, гомогенат трутневого расплода, бычки, морфология, мышечное волокно, коллагеновые волокна, фибробласт, кровеносный сосуд, электронно-микроскопические исследования

Для цитирования: Миронова И.В., Хабибуллин Р.М., Хабибуллин И.М. Морфологические изменения в мышечной ткани бычков после применения апиадаптогена. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 19–30.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-19-30>

Morphological changes in muscle tissue of bulls after the use of apiadaptogens

ABSTRACT

Relevance. This paper presents the results of a study examining the effect of an apiadaptogen on the performance of Bestuzhev bulls and morphological changes in muscle tissue.

Methods. The bulls were given drone brood homogenate as a tincture in their basic diet at a dose of 0.005 ml per 1 kg of body weight for Group II (experimental), 0.01 ml for Group III (experimental), and 0.015 ml per 1 kg of body weight for Group IV (experimental). Group I was the control group. The effectiveness of the test component was determined based on a range of intravital parameters, including live weight, average daily gain, slaughter indicators, chemical composition, the biological value of carcass flesh and raw fat, and morphological changes in muscle tissue.

Results. The change in live weight indicates that at the age of 18 months, the young animals of the III (experimental) group surpassed all their peers: I (control) group — by 22.1 kg, II (experimental) — by 9.5 kg and IV (experimental) group — by 1.7 kg, in terms of absolute live weight gain over the entire experimental period — by 22.1 kg; 9.4 and 1.8 kg, respectively. In all age periods, among the young animals of the experimental groups, the Bestuzhev breed bulls of the III (experimental) group demonstrated a higher average daily gain, amounting to 696.70 to 797.80 g. Slaughter qualities and chemical composition of the longissimus dorsi muscle were better in animals of the III (experimental) group, whose diet included drone brood homogenate at a dose of 0.01 ml / kg of body weight.

Histological examination of muscle tissue from bulls fed drone brood homogenate revealed normal muscle structure, while control animals showed some signs of dystrophic changes, including impaired protein and carbohydrate metabolism and mild lipid metabolism.

Thus, a comprehensive analysis demonstrates the beneficial effects of drone brood homogenate, which demonstrated its adaptogenic properties with the best results at a dosage of 0.01 ml per 1 kg of live weight, which was administered to bulls in Group III (experimental).

Key words: adaptogens, safflower leucea, drone homogenate, pantocrine, gobies, morphology, liver, hepatocytes

For citation: Mironova I.V., Khabibullin R.M., Khabibullin I.M. Morphological changes in muscle tissue of bulls after the use of apiadaptogen. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 19–30 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-19-30>

Введение/Introduction

В России активно ведется работа по совершенствованию отрасли мясного животноводства [1–3], так как она играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности государства и занимает приоритетное положение среди прочих направлений агропромышленного комплекса [4–7].

Современное развитие животноводческой отрасли показывает необходимость преодоления ряда препятствий для полного раскрытия потенциала мясного скотоводства и переработки продукции животного происхождения [8–10].

Особое значение уделяется качеству конечного продукта [11–15].

Для эффективного функционирования промышленных ферм важно обеспечить стабильную кормовую базу, оптимизировать рационы питания доступными методами, направленными на снижение себестоимости единицы продукции [16–18].

Многие ученые занимаются изучением вопросов адаптации сельскохозяйственных животных, исследуя влияние неблагоприятных внешних условий на производство сельскохозяйственной продукции.

Важнейшую роль здесь играет иммунная система, обеспечивающая регуляцию метаболизма организма животного и поддерживающая его устойчивость к внешним воздействиям [19–21].

Эффективность препаратов и добавок с адаптивным действием особенно заметна в периоды интенсивного роста и формирования основных функций организма животных [22–28].

Среди натуральных адаптогенов выделяется гомогенат трутневого расплода, содержащий сбалансированный комплекс важных биоактивных компонентов, таких как белки, жиры, аминокислоты, гормональные вещества и ферменты [29–33].

Трутневый расплод (гомогенат), обладающий богатым составом биологически активных соединений, таких как белки, аминокислоты, нуклеиновые кислоты, разнообразные ферменты, фосфолипиды, стероиды, углеводы, флавоноиды, широкий спектр минеральных элементов, а также водо- и жирорастворимые витамины, относится к числу перспективных адаптогенов, изучению которых уделяют особое внимание российские исследователи [34].

Большинство исследований сосредоточено на изучении отдельных физиологических механизмов, игнорируя их воздействие на процессы морфогенеза. Чтобы эффективно предотвращать стрессы у животных, требуются всесторонние знания о физиологии организма в условиях применения адаптогенов разного типа [35–37].

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В эксперименте по установлению оптимальной дозировки природного адаптогена проводился научно-хозяйственный опыт в Караидельском районе Республики Башкортостан Российской Федерации (с. Подлубово, КФХ ИП Габдуллин).

Для этого бычкам бестужевской породы на протяжении всего опыта, который длился 12 мес (с 2020 по 2021 г.), были созданы одинаковые условия содержания.

40 отобранных объектов исследования разделили на 4 равные группы по 10 бычков в каждой методом пар-аналогов (Овсянников А.И., 1976)¹.

Всем группам присвоили номера: I — контрольная, II, III и IV — опытные.

Материал для проведения эксперимента: гомогенат трутневого расплода (тестируемый препарат). Препарат использовали в виде настойки и задавали животным в утренние часы. Дозу изучаемого препарата рассчитывали по правилу Кларка исходя из массы животного².

Расчет показал, что норма введения адаптогена для группы II составляла 0,005 мл, III — 0,01 мл и IV — 0,015 мл на 1 кг массы тела животного. Рассчитанный объем настойки для каждой группы молодняка растворяли в 200 мл воды и задавали с питьем.

Тестируемый препарат животные получали в течение двух недель с перерывом в две недели¹.

Рационы составляли по детализированным нормам кормления, и по питательности они были сходными для всех групп животных³. При подборе учитывали физиологическое состояние животных, качество кормов, уровень продуктивности и периодически корректировали. Балансирование состава рационов проводилось в программе, предназначенной для расчета его питательности, планирования заготовок и расхода кормов для различных периодов содержания животных.

Рост бычков фиксировали по данным индивидуальных взвешиваний⁴ в утренние часы до кормления и поения. Линейный рост изучали на основании взятия основных промеров⁵.

Контрольный убой бычков для определения их мясной продуктивности осуществлялся в полугодовалом возрасте (по три животных из каждой группы) по методике ВАСХНИЛ, ВИЖ, ВНИИМП⁶.

Химический состав средней пробы мякоти туши и длиннейшей мышцы спины оценивали по рекомендации ВНИИМС⁷.

Особое внимание уделили гистологическим исследованиям (Olympus, Япония), которые проводили общепринятыми в гистологии методами с

¹ Овсянников А.И. Основы опытного дела в животноводстве М.: Колос, 1976; 303 с.

² Clark's Rule (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK541104/>)

³ Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных справочное пособие / сост. А. П. Калашников и др.; под ред. А. П. Калашникова и др. 2003; 455 с.

⁴ Весовое хозяйство поверено ФБУ «ЦСМ им. А.М. Муратшина в Республике Башкортостан»

⁵ Любимов А.И. и др. Практикум по разведению сельскохозяйственных животных. Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. 2012.

⁶ Методика изучения откормочных и мясных качеств крупного рогатого скота / ВАСХНИЛ, ВИЖ, ВНИИМП. М., 1977; 15 с.

⁷ Методические рекомендации по оценке мясной продуктивности и качества мяса убойного скота. Оренбург: ВНИИМС. 1984; 58 с.

последующей окраской парафиновых срезов гематоксилином и эозином и по методу Ван Гизона⁸.

Гистологические исследования проведены в лаборатории Башкирского ГАУ (Уфа, Россия).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов^{9, 10} и Guide for the Care and Use of Laboratory Animals¹¹.

При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

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

Одним из важнейших показателей в сельскохозяйственной практике при выращивании бычков является живая масса животного.

В связи с этим, особое внимание, наряду с породой и генотипом, необходимо уделить условиям содержания и кормлению, которое оказывает существенное влияние на продуктивные показатели.

Для более эффективной реализации генетического потенциала бычков бестужевской породы применение биологически активных продуктов пчеловодства вполне оправдано.

В наших исследованиях было установлено благоприятное воздействие разных доз тестируемой добавки на изучаемый комплекс показателей.

При постановке бычков бестужевской породы на опыт живая масса во всех изучаемых группах была практически на одном уровне в пределах 175,4 кг.

При переводе на дорастивание у молодняка уже определились межгрупповые изменения, и наиболее высокая живая масса отмечалась у животных III опытной группы (238,8 кг), что указывает на положительное влияние тестируемой биологически активной добавки.

Преимущество бычков III опытной группы сохранилось при сравнительной оценке уровня живой массы и в двенадцатимесячном возрасте. Так, живая масса бычков III опытной группы достигла 307,1 кг, что выше, чем у аналогов I (контрольной) группы на 7,7 кг (2,57%), II (опытной) — на 3,6 кг (1,19%) и IV (опытной) — на 0,7 кг (0,23%).

Более высокую динамику можно заметить и в последующие периоды. Так, в 15-месячном возрасте у бычков III (опытной) группы живая масса составляла 379,7 кг, превосходя аналогов из I (контрольной) группы на 14,3 кг (3,91%), II (опытной) группы — на 6,3 кг (1,69%) и IV (опытной) группы — на 1,2 кг (3,17%).

В 18-месячном возрасте, являющемся заключительным периодом выращивания бычков, наблюдалась аналогичная тенденция превосходства молодняка III (опытной) группы. Их живая масса составляла 451,8 кг, что выше, чем у сверстников I (контрольной) группы на 22,1 кг (5,14%), II (опытной) — на 9,5 кг (2,15%) и IV (опытной) группы — на 1,7 кг (0,38%).

Применение биологически активного компонента в рационе животных демонстрирует положительное влияние на динамику живой массы во все возрастные периоды, что подтверждает ранее выдвинутую нами гипотезу.

Анализ данных среднесуточного прироста живой массы свидетельствует о том, что в возрастной период от шести до девяти месяцев наибольшие показатели замечены у молодняка III группы, составив 696,70 г, что больше, чем у аналогов I (контрольной) группы — на 34,06 г (5,14%), II (опытной) группы — на 15,38 г (2,26%) и IV (опытной) группы — на 3,29 г (0,47%), а в период от пятнадцати до восемнадцати достигла 792,31 г и превзошла аналогов на 85,72 г (12,13%); 35,17 г (4,65%) и 5,5 г (0,70%) соответственно.

Увеличение среднесуточного прироста живой массы во всех группах происходило до пятнадцати месячного возраста, в то время как в период с 9 до 12 месяцев интенсивность роста отмечалась небольшими изменениями и составила в I (контрольной) группе 697,80 г; во II (опытной) группе — 727,47 г; в III (опытной) группе — 750,55 г и IV (опытной) группе — 745,05 г.

Наибольшее увеличение интенсивности роста у бычков бестужевской породы наблюдается в возрастной период с двенадцати до пятнадцати месяцев. У молодняка III (опытной) группы изучаемый показатель был выше, чем у сверстников I (контрольной) группы на 70,33 г (9,67%); II (опытной) группы — на 29,67 г (3,86%); и IV (опытной) — на 5,49 г (0,69%).

В заключительный период, независимо от способа организации кормления, интенсивность роста бычков всех групп снизилась, что связано с обменными процессами. В возрастной период от пятнадцати до восемнадцати месяцев наибольшие показатели замечены у молодняка III (опытной) группы, составив 792,31 г, что больше, чем у

⁸ Рева Г.В., Рева И.В., Недобыльская Ю.П. Гистология, цитология, эмбриология: учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по специальностям «лечебное дело», «медицинская биофизика», «медицинская биохимия». Владивосток: Издательство ДВФУ. 2015.

⁹ ГОСТ 34088-2017 Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за сельскохозяйственными животными.

¹⁰ Федеральный закон от 27.12.2018 N 498-ФЗ (ред. от 08.08.2024) Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации

¹¹ Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (<https://grants.nih.gov/grants/olaw/guide-for-the-care-and-use-of-laboratory-animals.pdf>)

аналогов I (контрольной) группы — на 85,72 г (12,13%), II (опытной) группы — на 35,17 г (4,65%) и IV (опытной) группы — на 5,5 г (0,70%). В тоже время установленная ранее межгрупповая динамика различий сохранилась. Данная закономерность прослеживается и за весь период опыта. Так, молодняк I (контрольной) группы за весь период уступал бычкам II (опытной) группы на 34,8 г (4,99%), III (опытной) группы — на 60,55 г (8,69%), IV (опытной) группы — на 55,62 г (7,98%).

Установлено, что у молодняка опытных групп убойные показатели были выше, чем в контроле. Так, предубойная живая масса у бычков I (контрольной) группы составляла 437,7 кг, что ниже, чем у сверстников II–IV (опытных) групп на 9,30–13,60 кг (2,12–3,11%); масса туши — 234,8 кг, что ниже на 6,70–11,50 кг (2,85–4,90%), выход туши — 53,6%, что ниже на 0,4–1,0%, убойная масса — 250,1 кг, что ниже на 6,5–10,6 кг (2,60–4,24%), убойный выход — 57,1%, что ниже на 0,3–0,7%. Молодняк III (опытной) группы при использовании гомогената трутневого расплода в виде настойки — 0,01 мл на 1 кг живой массы животного в сутки отличался лучшими убойными качествами в сравнении со сверстниками I (контрольной), II и IV (опытных) групп.

Анализ химического состава средних образцов фарша показал определенные различия между группами. В мясе молодняка опытных групп наблюдалось увеличение концентрации сухого вещества и снижение влаги. Так, содержание сухого вещества у бычков I (контрольной) группы составляло 30,77%, что ниже, чем у опытных аналогов на 0,40–1,06%, белка — 18,38%, что ниже на 0,13–0,48%, жира — 11,48%, что ниже на 0,26–0,56% ($P \leq 0,05$). Молодняк опытных групп занимал лидирующие позиции по содержанию триптофана. Так, у бычков I (контрольной) группы данный показатель составлял 360 мг%, превосходя опытных аналогов на 6,89–24,33 мг%. У контрольного молодняка содержание оксипролина составляло 52,40 мг%, что выше, чем у особей II, III и IV (опытных) групп на 0,56 мг%, 0,90 мг% и 0,79 мг% соответственно. При оценке качества белка важно учитывать соотношение триптофана к оксипролину. В цифровом выражении у бычков I (контрольной) группы данный показатель достиг значения 6,92, II (опытной) группы — 7,18, III (опытной) группы — 7,56 и IV (опытной) группы — 7,51.

В эксперименте были отобраны образцы околопочечного, межмышечного и подкожного жира-сырца. Содержание влаги в контрольном образце околопочечного жира-сырца составляло 12,73%, что выше, чем в опытных образцах на 0,73–1,42%; жира — 85,17%; белка — 1,90%; золы — 0,20%; энергетическая ценность — 33,49 МДж/г, что ниже соответственно на 0,60–1,27%, 0,06–0,13%, 0,01–0,02% ($P \leq 0,05$) и 0,27–0,52 МДж (0,81–1,55%). Аналогичная закономерность установлена и по составу межмышечного жира-сырца.

Анализ химического состава подкожного жира указывает на то, что содержание сухого вещества в контрольном образце составляло 86,27%, что ниже в сравнении с III опытным образцом на 0,84%; жира — 81,09% и ниже на 0,48%; белка — 5,02% и ниже на 0,35%; энергетическая ценность 1 кг жира — 32,44 МДж и ниже на 0,24 МДж/кг (0,74%), в то время как во II опытном образце по сравнению с контрольным разница составляла — 0,38%; 0,17%; 0,19%; 0,10 МДж/кг (0,31%), в IV опытном образце — 0,76%; 0,42%; 0,31% и 0,21 МДж/кг (0,65%), соответственно.

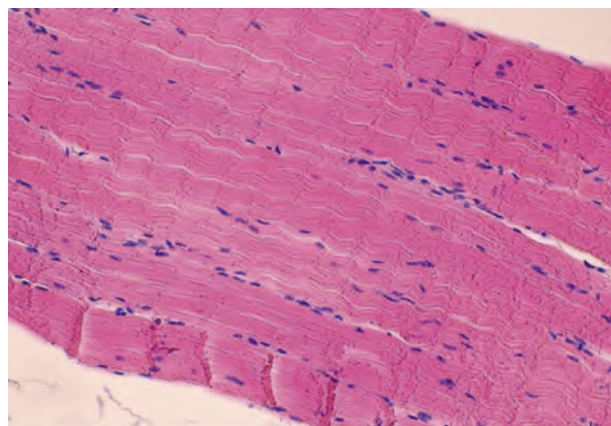
Таким образом, состав и энергетическая ценность жира-сырца бычков всех подопытных групп удовлетворяли требованиям. При этом у молодняка опытных групп наблюдалось лучшее отложение жира в туше, что является важным биологическим показателем.

Скелетная мышечная ткань животных I контрольной группы в большинстве исследованных участков на гистологических препаратах в основном соответствовала норме (рисунок 1).

Ткань формировали пучки мышечных волокон с характерной поперечной исчерченностью, которая обусловлена чередованием темных и светлых дисков, и хорошо просматривается на больших увеличениях светового микроскопа. Мышечные пучки располагались многочисленными параллельными рядами. Множество вытянутых базофильно окрашивающихся ядер миоцитов располагались чаще всего в их периферийных зонах под сарколеммой (клеточной оболочкой). Многоядерные мышечные волокна формировали так называемые миосимпласты. Каждое мышечное волокно было одето в тонкий слой эндомизия, представленного очень рыхлой светлой тканью с редкими тонкими волокнистыми структурами. Четко на гистологических препаратах эндомизий не просматривался, так как мышечные волокна характерно лежали довольно близко и плотно относительно друг друга.

Рис. 1. Структура неизменной скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Окраска гематоксилином и эозином. Микрофотография. Увел. X200.

Fig. 1. Structure of unchanged skeletal muscle tissue of an animal from Group I (control). Hematoxylin and eosin staining. Micrograph. Magnification: X200.



Несмотря на то, что в большей части исследуемая ткань соответствовала норме, в отдельных мышечных пучках были заметны признаки дистрофических процессов.

Одним из признаков было набухание эндомизия, которое проявлялось в сильном просветлении промежутков между немного набухшими мышечными волокнами (рисунок 2).

Местами эти промежутки были шире самих мышечных волокон. В некоторых таких зонах просматривались небольшие скопления полиморфных клеток.

При окраске препаратов по методу Ван-Гизону вследствие дистрофических процессов в таких участках изменялись тинкториальные свойства (специфичность окрашивания тканей) мышечной ткани, пикрофуксин окрашивал мышечные волокна в оранжево-красноватые тона вместо специфического ярко-желтого цвета (рисунок 3).

Рис. 2. Структура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Отек эндомизия (Э) с наличием полиморфных клеток (↑). Окраска гематоксилином и эозином. Микрофотография. Увел. X400.

Fig. 2. Structure of skeletal muscle tissue of the animal from group I (control). Edema of the endomysium (E) with the presence of polymorphic cells (↑). Hematoxylin and eosin staining. Micrograph. Magnification: X400.

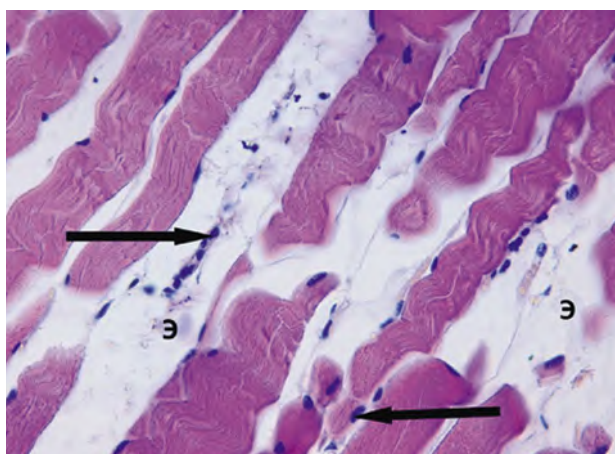
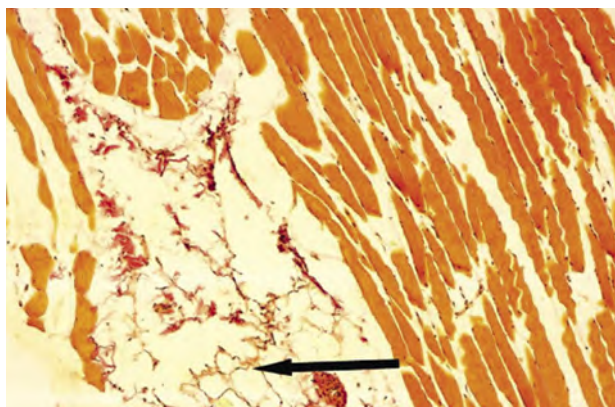


Рис. 3. Структура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Изменение тинкториальных свойств мышечной ткани, жировая дистрофия (↑). Окраска по Ван-Гизону. Микрофотография. Увел.: X100.

Fig. 3. Structure of skeletal muscle tissue of the animal from group I (control). Changes in tinctorial properties of muscle tissue, fatty degeneration (↑). Van Gieson staining. Micrograph. Magnification: X100.



На этом же рисунке видны участки с признаками выраженной жировой дистрофии.

Вокруг отдельных мышечных пучков также определялся отек перимизия — более плотной соединительнотканной оболочки, обычно состоящей из более грубых волокнистых структур, между которыми содержатся кровеносные, лимфатические сосуды, а также нервные волокна (рисунок 4).

В таких участках кровеносные сосуды были слабо расширены, с отечными стенками, многие сосуды кровенаполнены.

На электронно-микроскопическом уровне просматривались более тонкие детали скелетной мышечной ткани. Выявлялись участки мышечных волокон без ультраструктурных изменений. Каждая скелетная мышечная клетка представляет собой длинное мышечное волокно с большим количеством ядер в цитоплазме (саркоплазме), расположенных по периферии клетки (рисунок 5).

Рис. 4. Структура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Отек перимизия (П), сосудистый стаз (↑). Окраска гематоксилином и эозином. Микрофотография. Увел. X200.

Fig. 4. Structure of skeletal muscle tissue of animal from the control group. Perimysium edema (P), vascular stasis (↑). Hematoxylin and eosin staining. Micrograph. Magnification: X200.

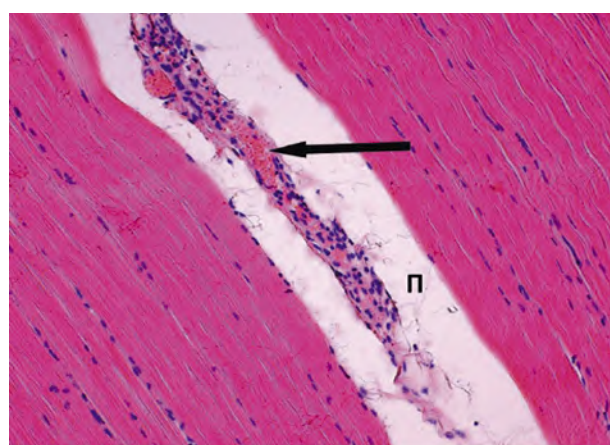
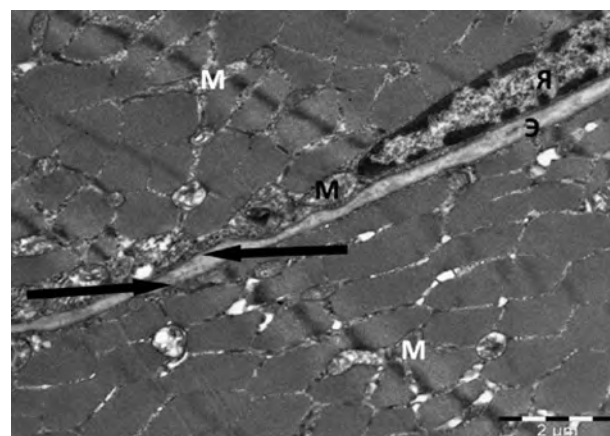


Рис. 5. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Ядро (Я), эндомизий (Э), митохондрии (М), сарколемма (↑). Электронная микрофотография. Увел. X6000.

Fig. 5. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of animal I (control) group. Nucleus (N), endomysium (E), mitochondria (M), sarcolemma (↑). Electron micrograph. Magnification X6000.



Мышечная клетка покрыта клеточной оболочкой (сарколеммой). Кроме ядер, в саркоплазме имеется большое количество округлых, овальных или вытянутых митохондрий с многочисленными тонкими кристами, некоторое количество рибосом и полирибосом, а также гранул гликогена (рисунок 6).

Кроме этого, по всей длине клетки в саркоплазме вдоль клеточной сарколеммы содержится множество компактно лежащих миофибрилл, состоящих из миофиламентов актина и миозина, а между ними — множество мелких и оптически темных митохондрий.

Просматривающиеся при световой микроскопии чередования темных и светлых полос в скелетном мышечном волокне определяются регулярным чередованием в миофибриллах различных преломляющих свет участков (дисков) — изотропных и анизотропных — светлых (I) и темных (A) дисков (рисунок 7).

Известно, что A-диски образованы нитями миозина, а I-диски — нитями актина. В центре I-дисков

видна темная Z-линия. Участок между соседними Z-линиями называется саркомером, который является структурным элементом миофибрилл.

Кроме названных органелл, в скелетном мышечном волокне имеются специфические впячивания саркоплазмы внутрь клетки, так называемые Т-трубочки, пересекающие мышечное волокно и связанные с саркоплазматическим ретикуломом.

Если в эндомизии тонких коллагеновых волокон не так много, то в перимизии коллагеновые фибриллы сложены в довольно плотные пучки средних размеров (рисунок 8).

Среди пучков коллагеновых волокон определяются вытянутые фибробластические клетки с большим количеством вытянутых каналов гранулярного эндоплазматического ретикула, а также тонкостенные кровеносные сосуды с типичным для них строением.

В отдельных участках определяются пучки миелинизированных нервных волокон (рисунок 9).

Рис. 6. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Ядро (Я), эндомизий (Э), митохондрии (М), рибосомы (Р), миофибриллы (Мф), гликоген (†). Электронная микрофотография. Увел.Х6000.

Fig. 6. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of animal I (control) group. Nucleus (N), endomysium (E), mitochondria (M), ribosomes (R), myofibrils (Mf), glycogen (†). Electron micrograph. Magnification X6000.

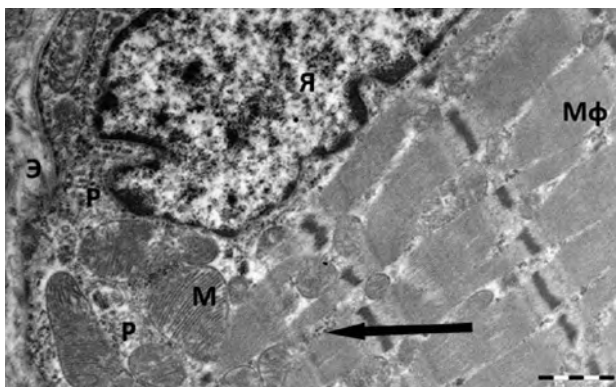


Рис. 7. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Изотропные светлые диски (I), анизотропные темные диски (A), темная Z-линия (†), митохондрии (М). Электронная микрофотография. Увел.Х6000.

Fig. 7. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of animal I (control) group. Isotropic light disks (I), anisotropic dark disks (A), dark Z-line (†), mitochondria (M). Electron micrograph. Magnification X6000.

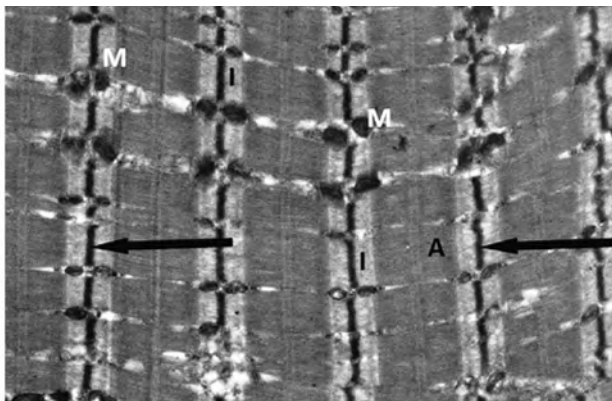


Рис. 8. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Перимизий (П), мышечное волокно (Мв), ядро мышечной клетки (Я); коллагеновые волокна (Кв), фибробласт (Ф), сарколемма (†). Электронная микрофотография. Увел.Х8000.

Fig. 8. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of animal I (control) group. Perimysium (P), muscle fiber (MF), muscle cell nucleus (N); collagen fibers (CF), fibroblast (F), sarcolemma (†). Electron micrograph. Magnification X8000.

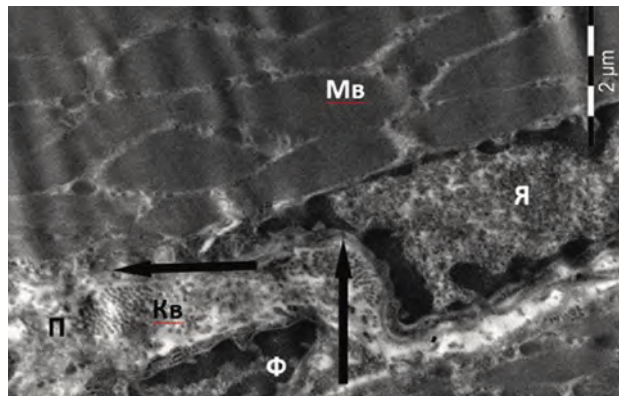
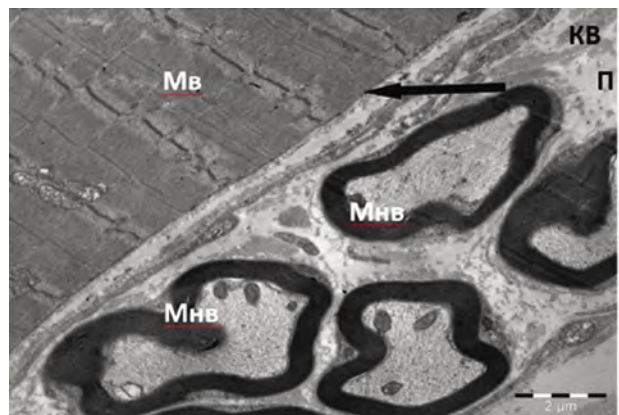


Рис. 9. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Перимизий (П), мышечное волокно (Мв), коллагеновые волокна (Кв), миелиновое нервное волокно (Мнв), сарколемма (†). Электронная микрофотография. Увел.Х6000.

Fig. 9. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of animal I (control) group. Perimysium (P), muscle fiber (MF), collagen fibers (CF), myelinated nerve fiber (MNF), sarcolemma (†). Electron micrograph. Magnification X6000.



При изучении участков мышечной ткани с признаками дистрофических процессов на ультраструктурном уровне было выявлено опустошение и отек саркоплазмы миоцитов, особенно это заметно было вокруг ядер (рисунок 10).

Резко уменьшалось количество митохондрий, они становились очень темными, кристы не просматривались, исчезали рибосомы и полирибосомы, а также гранулы гликогена. Ядра миоцитов сильно просветлялись, часть хроматина подвергалась деструкции. Пучки миофибрилл в саркоплазме истончались, между ними определялись островки отежных участков.

Z-линии в таких местах сильно истончались.

В отдельных отежных участках определялось заметное расширение канальцев саркоплазматического ретикулума наряду с просветлением матрикса митохондрий и разрушением крист внутри них (рисунок 11).

Рис. 10. Дистрофические изменения в скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. ядро (Я); перимизий (П), мышечное волокно (Мв), разрушение органелл в саркоплазме и опустошение цитозоля (↑); истончение Z-линий (Z). Электронная микрофотография. Увел.Х6000.

Fig. 10. Dystrophic changes in the skeletal muscle tissue of animals of group I (control). nucleus (N); perimysium (P), muscle fiber (MF), destruction of organelles in the sarcoplasm and depletion of the cytosol (↑); thinning of the Z-lines (Z). Electron micrograph. Magnification X6000.

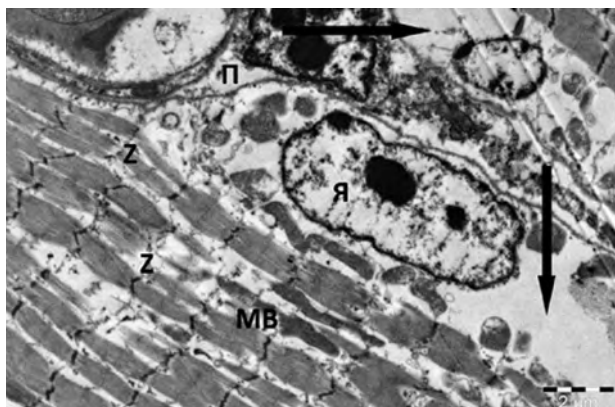
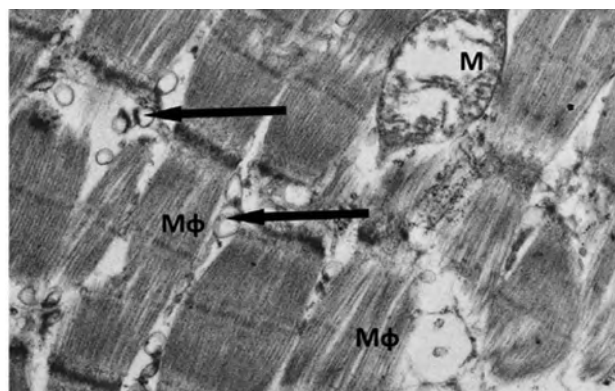


Рис. 11. Дистрофические изменения в скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Расширение канальцев саркоплазматического ретикулума (↑), митохондрии (М), миофибриллы (Мф). Электронная микрофотография. Увел.х8000.

Fig. 11. Dystrophic changes in the skeletal muscle tissue of animals of group I (control). Dilatation of the sarcoplasmic reticulum tubules (↑), mitochondria (M), myofibrils (Mf). Electron micrograph. Magnification x8000.



Одним из признаков дистрофических изменений было набухание эндомизия, который расширялся за счет этого.

Это проявлялось в сильном просветлении промежутков между набухшими мышечными волокнами (рисунок 12).

Таким образом, комплексные морфологические исследования показали, что у животных контрольной группы скелетная мышечная ткань характеризуется наличием как неизмененных по структуре участков, так и отдельных участков с дистрофическими изменениями, выражающимися в признаках нарушения белкового и углеводного обменов, и слабо выраженного жирового обмена.

В группе животных, которые получали гомогенат трутневого расплода, в скелетной мышечной ткани патологических изменений не выявлено, и ткань в основном соответствует норме (рисунок 13).

Рис. 12. Дистрофические изменения в скелетной мышечной ткани животного I (контрольной) группы. Ядро (Я), эндомизий (Э), митохондрии (М), миофибриллы (Мф), сарколемма (↑). Электронная микрофотография. Увел.х6000.

Fig. 12. Dystrophic changes in the skeletal muscle tissue of animals of group I (control). Nucleus (N), endomysium (E), mitochondria (M), myofibrils (Mf), sarcolemma (↑). Electron micrograph. Magnification x6000.

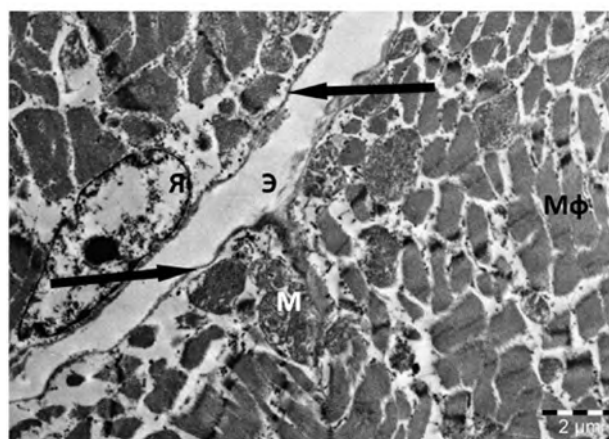
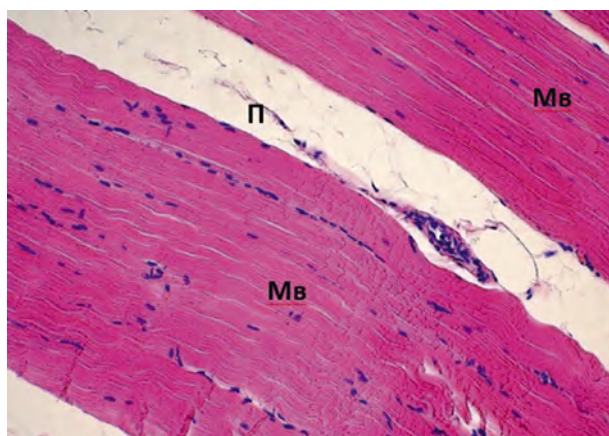


Рис. 13. Структура неизменной скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Перимизий (П), мышечные волокна (Мв). Окраска гематоксилин-эозином. Микрофотография. Увел.Х200.

Fig. 13. Structure of unchanged skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Perimysium (P), muscle fibers (MF). Hematoxylin and eosin staining. Micrograph. Magnification: X200.



Мышечные клетки в виде вытянутых волокнистых структур под сарколеммой содержат многочисленные удлиненные ядра. Каждое мышечное волокно покрыто тонким слоем сарколеммы (клеточной оболочки), которая на гистологических препаратах четко не просматривается. Между волокнами определяется очень тонкая полоска светлого эндомизия.

Пучки мышечных волокон окружены тонкими прослойками соединительной ткани — перимизием, который содержит кровеносные сосуды и нервные волокна типичной структуры (рисунок 14).

Несколько многоядерных мышечных волокон формируют миосимпласты.

Тинкториальные свойства скелетной мышечной ткани животных данной группы не изменены, при окраске гистологических препаратов по методу

Ван-Гизон пикрофуксином они окрашиваются в ярко-желтый цвет (рисунок 15).

В это же время соединительнотканые прослойки специфично окрашивались в ярко-красные тона.

На ультраструктурном уровне изменений в строении скелетных мышечных волокон нами не выявлено.

В электронном микроскопе хорошо просматривается поперечная исчерченность мышечных клеток из темных А-полос и светлых I — полос с Z-линиями, располагающимися на одном уровне (рисунок 16).

Мышечные клетки представляют собой длинное мышечное волокно с большим количеством ядер в цитоплазме (саркоплазме), они располагаются по краю клеток (рисунок 17).

Рис. 14. Структура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Перимизий (П) с кровеносными сосудами (↑), мышечные волокна (МВ). Окраска гематоксилин-эозином. Микрофотография. Увел. X400.

Fig. 14. Structure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Perimysium (P) with blood vessels (↑), muscle fibers (MF). Hematoxylin and eosin staining. Micrograph. Magnification: X400.

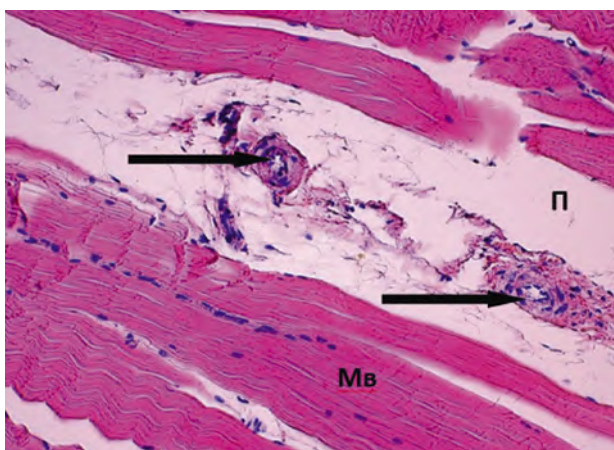


Рис. 15. Структура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Сохранение тинкториальных свойств мышечной ткани. Окраска по Ван-Гизону. Микрофотография. Увел. X100.

Fig. 15. Structure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Preservation of tinctorial properties of muscle tissue. Van Gieson staining. Micrograph. Magnification: X100.

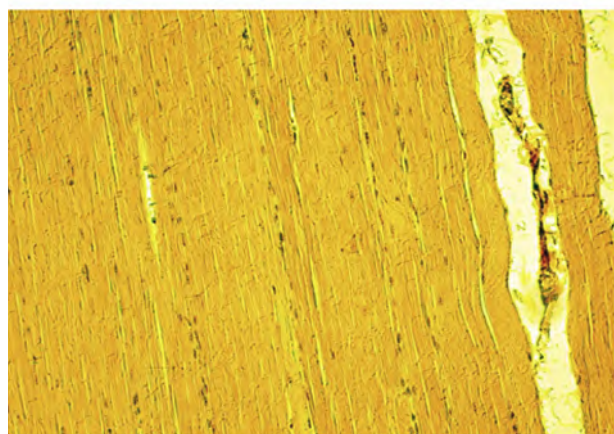


Рис. 16. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Изотропные светлые диски (I), анизотропные темные диски (A), темная Z-линия (↑), митохондрии (M). Электронная микрофотография. Увел. X5000.

Fig. 16. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Isotropic light disks (I), anisotropic dark disks (A), dark Z-line (↑), mitochondria (M). Electron micrograph. Magnification X5000.

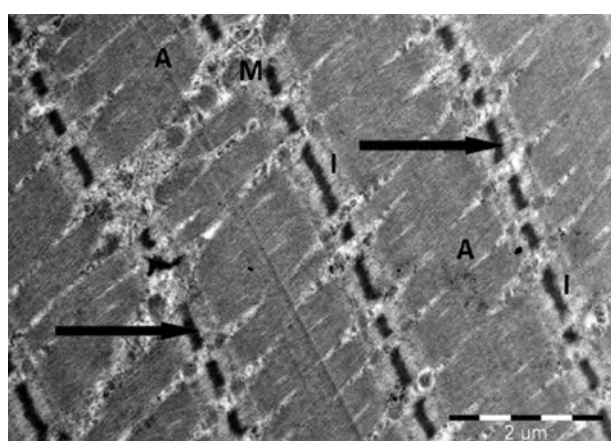


Рис. 17. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Ядро (Я), митохондрии (M), сарколемма (↑). Электронная микрофотография. Увел. X4000.

Fig. 17. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Nucleus (N), mitochondria (M), sarcolemma (↑). Electron micrograph. Magnification X4000.

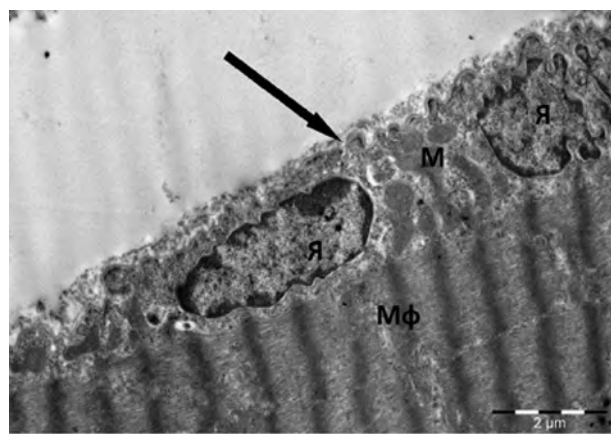
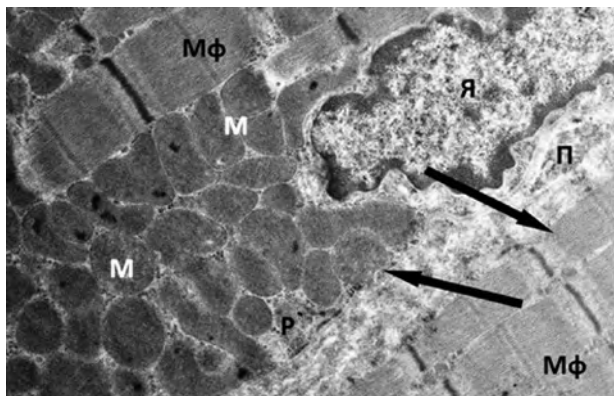


Рис. 18. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Ядро (Я), митохондрии (М), миофибриллы (Мф), рибосомы (Р), сарколемма (↑). Электронная микрофотография. Увел. X6000.

Fig. 18. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Nucleus (N), mitochondria (M), myofibrils (Mf), ribosomes (R), sarcolemma (↑). Electron micrograph. Magnification: X6000.



Каждая мышечная клетка покрыта сверху плотной тонкой клеточной оболочкой (сарколеммой).

Около ядер в саркоплазме выявляется большое количество округлых, овальных или вытянутых митохондрий с многочисленными тонкими кристами, некоторое количество рибосом и полирибосом, а также гранул гликогена (рисунок 18).

В саркоплазме вдоль клеточной сарколеммы содержится множество компактно лежащих миофибрилл, состоящих из миофиламентов актина и миозина, а между ними множество мелких и темных митохондрий. Участок между соседними Z-линиями называется саркомером, который является структурным элементом миофибрилл. Кроме названных органелл, в скелетном мышечном волокне имеются специфические впячивания сарколеммы внутрь клетки, так называемые Т-трубочки, пересекающие мышечное волокно и связанные с саркоплазматическим ретикуломом. В норме эти элементы в электронном микроскопе почти не видны, так как они сжаты между пучками миофибрилл.

В перимизии коллагеновые фибриллы сложены в относительно плотные пучки средних размеров, а среди пучков коллагеновых волокон определяются фибробластические клетки с большим количеством рибосом и каналов гранулярного эндоплазматического ретикулума (рисунок 19).

Кроме них, в перимизии встречаются тонкостенные кровеносные сосуды с типичным для них строением, а также могут выявляться пучки миелинизированных и немиелинизированных нервных волокон (рисунок 20).

Выводы/Conclusions

Введение в основной рацион бычков бестужевской породы гомогената трутневого расплода в форме настойки оказывает дозозависимое положительное влияние на их продуктивные показатели. Наибольшая эффективность установлена для

Рис. 19. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Перимизий (П), мышечное волокно (Мв), коллагеновые волокна (Кв), фибробласт (Ф), кровеносный сосуд (Кс), сарколемма (↑). Электронная микрофотография. Увел. X2000.

Fig. 19. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Perimysium (P), muscle fiber (MF), collagen fibers (CF), fibroblast (F), blood vessel (BV), sarcolemma (↑). Electron micrograph. Magnification: X2000.

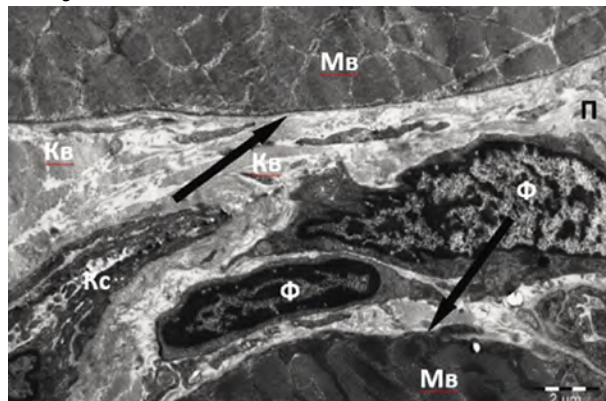
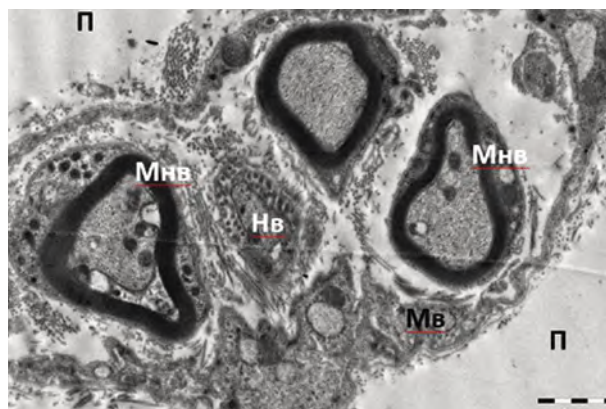


Рис. 20. Ультраструктура скелетной мышечной ткани животного после применения гомогената трутневого расплода. Коллагеновые волокна (Кв), миелиновое нервное волокно (Мнв), немиелинизированное нервное волокно (Нв) в перимизии (П). Электронная микрофотография. Увел. X3000.

Fig. 20. Ultrastructure of skeletal muscle tissue of an animal after application of drone brood homogenate. Collagen fibers (Cf), myelinated nerve fiber (MNF), unmyelinated nerve fiber (UF) in the perimysium (P). Electron micrograph. Magnification: X3000.



дозировки 0,01 мл/кг живой массы тела (III опытная группа).

Бычки III опытной группы достоверно превосходили аналогов контрольной группы по живой массе в 18-месячном возрасте на 22,1 кг (5,14%) и демонстрировали более высокий среднесуточный прирост на протяжении всего периода опыта (максимально 797,80 г).

Применение гомогената в оптимальной дозе (0,01 мл/кг) способствовало улучшению убойных показателей: повышению предубойной массы, массы и выхода туши, а также убойного выхода по сравнению с контрольной группой.

Установлены позитивные изменения в качественном составе продукции. Мясо животных опытных групп, в особенности III группы, характеризовалось более высоким содержанием сухого

вещества, белка и жира, а также улучшенным соотношением триптофана к оксипролину, что указывает на повышенную биологическую ценность белка.

Гистологическое исследование подтвердило протекторное действие гомогената трупного расплода на морфологию мышечной ткани. У животных III опытной группы структура скелетных мышц соответствовала норме без признаков дистрофии, в отличие от контрольной группы, где наблюдались отёк эндомизия и перимизия,

дистрофические изменения миоцитов и нарушения ультраструктуры органелл.

Таким образом, гомогенат трупного расплода, проявляя свойства апиадаптогена в дозе 0,01 мл/кг живой массы, не только стимулирует рост и мясную продуктивность бычков, но и способствует поддержанию структурной целостности мышечной ткани, что в совокупности определяет его эффективность в качестве натуральной кормовой добавки в мясном скотоводстве.

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. Гриценко С.А., Гриценко М.Д., Ребезов М.Б., Мухамбетов Д.Г., Хакназаров А.А.У. Мясная продуктивность бычков и особенности ее наследования в условиях промышленного производства. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024; 4(9): 192–202. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_25](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_25)
2. Никонова Е.А., Косилов В.И., Ребезов М.Б., Кубатбеков Т.С. Убойные качества телок в зависимости от породной принадлежности. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024; 5(109): 289–293. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2024-109-5-289-293>
3. Косилов В., Кубатбеков Т., Рахимжанова И., Седых Т., Ребезов М., Жаймышева С., Абдурасулов А. Линейный рост телок разных пород при интенсивном выращивании. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024; 3(8): 105–114. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_3\(8\)_13](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_3(8)_13)
4. Чинаров А.В. Резервы производства мяса: породное районирование мясного скотоводства в России. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2020; 12: 23–26. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2020-0-12-23-26>
5. Ильченко И. Мясное скотоводство нуждается в интенсивном развитии и здоровой конкуренции. *Эффективное животноводство*. 2021; 5 (171): 91–99. EDN DPUGCK
6. Осянин Д.Н. Петрунина И.В. Современное состояние и тенденции развития российского мясного скотоводства. *Мясная индустрия*. 2021; 4, 32–35. <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2021-04-32-35>
7. Ветрова Е.В., Ребезов М.Б., Топурия Г.М. Современное состояние и перспективы развития мясного скотоводства. *Молодой ученый*. 2015; 3(83): 107–110. EDN THQPYN
8. Губер Н.Б., Ребезов М.Б., Топурия Г.М. Минимизация рисков при внедрении технологических инноваций в мясной промышленности (на примере Южного Урала). *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2014; 8(2): 180–188. EDN SGMJPI
9. Губер Н.Б., Ребезов М.Б., Топурия Г.М. Инструменты снижения рисков при реализации инновационных проектов в сфере продуктов питания животного происхождения. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2014; 8(1): 156–159. EDN SAGIWF
10. Нагибина В.В., Ребезов М.Б., Ребезов Я.М. Оценка качества мясной продукции квалитетическим методом. *Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова*. 2015; 1: 331–332. EDN VBDLLR
11. Рахимжанова И.А., Косилов В.И., Губайдуллин Н.М., Газеев И.Р., Ребезов М.Б. Химический состав жировой ткани туши телок разных пород. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024; 4(9): 273–279. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_34](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_34)
12. Рахимжанова И.А., Никонова Е.А., Ребезов М.Б., Миронова И.В., Гадиев Р.Р., Губайдуллин Н.М., Седых Т.А. Химический состав и энергетическая ценность мышечной ткани телок разных генотипов. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2023; 3: 94–100. https://doi.org/10.52754/16948696_2023_3_12

REFERENCES

1. Gritsenko S.A., Gritsenko M.D., Rebezov M.B., Mukhambetov D.G., Khaknazarov A.A.U. Meat productivity of young bulls and features of its inheritance under industrial production conditions. *Bulletin of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary science and animal science*. 2024; 4(9): 192–202. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_25](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_25)
2. Nikonova E.A., Kosilov V.I., Rebezov M.B., Kubatbekov T.S. Slaughter qualities of heifers depending on breed affiliation. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024; 5(109): 289–293. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2024-109-5-289-293>
3. Kosilov V., Kubatbekov T., Rakhimzhanova I., Sedykh T., Rebezov M., Zhaimysheva S., Abdurasulov A. Linear growth of heifers of different breeds under intensive rearing. *Bulletin of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary science and animal science*. 2024; 3(8): 105–114. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_3\(8\)_13](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_3(8)_13)
4. Chinarov A.V. Meat production reserves: breed zoning of beef cattle breeding in Russia. *Economics of agricultural and processing enterprises*. 2020; 12: 23–26. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2020-0-12-23-26>
5. Ilchenko I. Beef cattle breeding needs intensive development and healthy competition. *Effective Animal Husbandry*. 2021; 5 (171): 91–99. EDN DPUGCK
6. Osyani D.N. Petrunina I.V. Current state and development trends of Russian beef cattle breeding. *Meat Industry*. 2021; 4, 32–35. <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2021-04-32-35>
7. Vetrovaya E.V., Rebezov M.B., Topuria G.M. Current State and Development Prospects of Beef Cattle Breeding. *Young Scientist*. 2015; 3(83): 107–110. EDN THQPYN
8. Guber N.B., Rebezov M.B., Topuria G.M. Minimizing Risks in Implementing Technological Innovations in the Meat Industry (using the Southern Urals as an Example). *Bulletin of South Ural State University, Series "Economics and Management"*. 2014; 8(2): 180–188. EDN SGMJPI
9. Guber N.B., Rebezov M.B., Topuria G.M. Risk Mitigation Tools for Implementing Innovative Projects in the Field of Animal-Origin Food Products. *Bulletin of South Ural State University, Series "Economics and Management"*. 2014; 8(1): 156–159. EDN SAGIWF
10. Nagibina V.V., Rebezov M.B., Rebezov Ya.M. Quality Assessment of Meat Products Using a Qualimetric Method. *International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of Vasily Matveevich Gorbato*. 2015; 1: 331–332. EDN VBDLLR
11. Rakhimzhanova I.A., Kosilov V.I., Gubaidullin N.M., Gazeev I.R., Rebezov M.B. Chemical composition of adipose tissue of carcasses of heifers of different breeds. *Bulletin of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary medicine and animal science*. 2024; 4(9): 273–279. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_34](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_34)
12. Rakhimzhanova I.A., Nikonova E.A., Rebezov M.B., Mironova I.V., Gadiev R.R., Gubaidullin N.M., Sedykh T.A. Chemical composition and energy value of muscle tissue of heifers of different genotypes. *Bulletin of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary Science, and Animal Science*. 2023; 3: 94–100. https://doi.org/10.52754/16948696_2023_3_12

13. Торшков А.А., Седых Т.А., Ребезов М.Б., Быкова О.А., Гадиев Р.Р., Фаткуллин Р.Р. Влияние генотипа телок на развитие естественно-анатомических частей полутуши телок разных генотипов. *Мичуринский агрономический вестник*. 2022; 4: 29–35. EDN ZTQZGH
14. Косилов В.И., Андриенко Д.А., Толочка В.В., Ребезов М.Б., Седых Т.А., Ермолова Е.М. Влияние скрещивания скота чёрно-пёстрой и казахской белоголовой пород на мясные качества помесей. *Мичуринский агрономический вестник*. 2020; (4): 18–23. EDN GAVUOM
15. Рахимжанова И.А., Косилов В.И., Габидуллин Н.М., Газеев И.Р., Ребезов М.Б. Пищевая ценность жировой ткани туши телок разных пород. *Национальные приоритеты развития агропромышленного комплекса: Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, Оренбург, 15 ноября 2024 года*. Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет, 2024; 206–209. EDN KCVYFB
16. Буйаров В.С. Экономико-технологические аспекты производства продукции животноводства и птицеводства. *Вестник аграрной наук*. 2019; 6 (81): 77–88. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.6.77>
17. Насамбаев Е.Г., Ахметалиева А.Б., Нугманова А.Е., Досжанова А.О. Рост и развитие молодняка мясных пород в зависимости от породной принадлежности и сезона рождения. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020; 2 (82): 206–212. EDN LUEVIT
18. Квочкин А.Н., Квочкина В.И. О резервах развития мясного скотоводства. *Наука и Образование*. 2021; 4: 1. EDN GBXEYP
19. Ажмулдинов Е.А., Титов М.Г., Кизаев М.А., Коваленко В.П., Бабичева И.А. Сравнительная оценка продуктивных качеств бычков различных пород в условиях откормочной площадки. *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. 2020; 2 (59): 53–61. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.007>
20. Nikolaeva O., Andreeva A., Altynbekov O., Mishukovskaya G., Ismagilova E. Probiotic drugs impact on the innate immunity factors. *Journal of Global Pharma Technology*. 2020; 12(1): 38–45.
21. Khan A., Akram M., Zainab R., Thiruvengadam M., Daniyal M., Zakki S.A. et al. Anti-anxiety properties of selected medicinal plants. *Current Pharmaceutical Biotechnology*. 2022; 23–8: 1041–1060. <https://doi.org/10.2174/1389201022666210122125131>
22. 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>
23. Урюмцева Т.И., Горелик О.В., Горелик А.С., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Весовой рост и сохранность телят на фоне применения минеральных кормовых добавок. *Аграрная наука*. 2024; 388(11): 55–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-55-61>
24. Горелик О.В., Горелик А.С., Урюмцева Т.И., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Продуктивные качества коров на фоне применения минеральных кормовых добавок. *Аграрная наука*. 2024; 388(11): 67–74. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-67-74>
25. Зайцев В.В., Боголюбова Н.В., Короткий В.П., Зайцева Л.М., Кичапов К.А., Рыжов В.А. Влияние хвойно-энергетической добавки на антиоксидантный статус и белковый обмен у коров в транзитный период. *Аграрная наука*. 2025; 396 (07): 39–47. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-39-47>
26. Джуламанов К.М., Герасимов Н.П., Сафронова А.А. Влияние полиморфизмов генов гормона роста и тиреоглобулина на морфологический состав туши и биоконверсию кормов в мясную продукцию у герефордских бычков. *Аграрная наука*. 2025; 400 (11): 83–90. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-83-90>
27. Шейда Е.В., Кван О.В., Шошина О.В., Сечнев Ю.А., Топурия Л.Ю. Влияние протеолитических ферментов на степень усвоения питательных веществ в организме бычков. *Аграрная наука*. 2025; 397 (08): 39–44. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-39-44>
28. Тарасова Е.И., Сизова Е.А., Яушева Е.В., Лебедев С.В. Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементарным составом сыворотки крови коров красной степной породы. *Аграрная наука*. 2025; 399 (10): 121–132. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132>
29. Кайзер А.А. Содержание биологически активных веществ в пантах и рогах самцов северных оленей. *Сельскохозяйственная биология*. 2006; 41–6: 53–57. EDN HVKPVP
13. Torshkov A.A., Sedykh T.A., Rebezov M.B., Bykova O.A., Gadiev R.R., Fatkullin R.R. Influence of Heifer Genotype on the Development of Natural Anatomical Parts of the Carcass of Heifers of Different Genotypes. *Michurinsky Agronomic Bulletin*. 2022; 4: 29–35. EDN ZTQZGH
14. Kosilov V.I., Andrienko D.A., Tolochka V.V., Rebezov M.B., Sedykh T.A., Ermolova E.M. The Effect of Crossbreeding Black-and-White and Kazakh White-Headed Cattle on the Meat Qualities of Crossbreeds. *Michurinsky Agronomic Bulletin*. 2020; (4): 18–23. EDN GAVUOM
15. Rakhimzhanova I.A., Kosilov V.I., Gabidullin N.M., Gazeev I.R., Rebezov M.B. Nutritional Value of Carcass Fat Tissue of Heifers of Different Breeds. *National Priorities for the Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with International Participation, Orenburg, November 15, 2024*. Orenburg: Orenburg State Agrarian University, 2024; 206–209. EDN KCVYFB
16. Buyarov V.S. Economic and Technological Aspects of Livestock and Poultry Production. *Bulletin of Agrarian Sciences*. 2019; 6 (81): 77–88. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.6.77>
17. Nasambaev E.G., Akhmetalieva A.B., Nugmanova A.E., Doszhanova A.O. Growth and Development of Young Beef Breeds Depending on Breed and Season of Birth. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020; 2 (82): 206–212. EDN LUEVIT
18. Kvochkin A.N., Kvochkina V.I. On the Reserves for the Development of Beef Cattle Breeding. *Science and Education*. 2021; 4: 1. EDN GBXEYP
19. Azhmuldinov E. A., Titov M. G., Kizaev M. A., Kovalenko V. P., Babicheva I. A. Comparative assessment of the productive qualities of bulls of different breeds in feedlot conditions. *Vestnik of Buryat state academy of agriculture named after V. Philippov*. 2020; 2 (59): 53–61. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.007>
20. Nikolaeva O., Andreeva A., Altynbekov O., Mishukovskaya G., Ismagilova E. Probiotic drugs impact on the innate immunity factors. *Journal of Global Pharma Technology*. 2020; 12(1): 38–45.
21. Khan A., Akram M., Zainab R., Thiruvengadam M., Daniyal M., Zakki S.A. et al. Anti-anxiety properties of selected medicinal plants. *Current Pharmaceutical Biotechnology*. 2022; 23–8: 1041–1060. <https://doi.org/10.2174/1389201022666210122125131>
22. Gorelik V.S., Rebezov M.B., Gorelik O.V., Knysh I.V. Use of chitin preparations to improve cow productivity. *Normative-legal regulation in veterinary medicine*. 2025; (4): 191–195. <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2025.4.191>
23. Uryumtseva T.I., Gorelik O.V., Gorelik A.S., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Weight growth and safety of calves against the background of the use of mineral feed additives. *Agrarian science*. 2024; 388(11): 55–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-55-61>
24. Gorelik O.V., Gorelik A.S., Uryumtseva T.I., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Productive qualities of cows against the background of the use of mineral feed additives. *Agrarian science*. 2024; 388(11): 67–74 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-67-74>
25. Zaitsev V.V., Bogolyubova N.V., Korotky V.P., Zaitseva L.M., Kichapov K.A., Ryzhov V.A. Effect of a coniferous energy additive on antioxidant status and protein metabolism in cows during the transit period. *Agrarian science*. 2025; 396 (07): 39–47 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-39-47>
26. Dzhulamanov K.M., Gerasimov N.P., Safronova A.A. The effect of growth hormone and thyroglobulin gene polymorphisms on the morphological composition of carcasses and the bioconversion of feed into meat products in Hereford bulls. *Agrarian science*. 2025; 400 (11): 83–90 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-83-90>
27. Sheida E.V., Kvan O.V., Shoshina O.V., Sechnev Yu.A., Topuria L. Yu. The effect of proteolytic enzymes on the degree of absorption of nutrients in the body of bull calves. *Agrarian science*. 2025; 397 (08): 39–44 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-39-44>
28. Tarasova E.I., Sizova E.A., Yausheva E.V., Lebedev S.V. Association of the rs8193046 polymorphism of the TLR4 gene with the elemental composition of the blood serum of red steppe cows. *Agrarian science*. 2025; 399 (10): 121–132 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132>
29. Kaiser A.A. Content of biologically active substances in the antlers and antlers of male reindeer. *Agricultural Biology*. 2006; 41–6: 53–57. EDN HVKPVP

30. Dementyev E.P., Bazekin G.V., Tokarev I.N., Lobodina G.V., Karimov F.A., Andreeva A.V. *et al.* The application of physical and biological stimulants in livestock breeding. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13-S10: 8325–8330. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-217-220>
31. Khabibullin R.M., Mironova I.V., Derkho M.A., Strizhikov V.K., Strizhikova S.V., Kouassi J. Morphofunctional changes in the kidneys of mice with the use of adaptogens against the background of physical exertion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management*. 2020; 613: 012052. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012052>
32. Ажмулдинов Е.А., Титов М.Г., Кизаев М.А., Тагиров Х.Х. Эффективность использования хитозана с удч серебра для сокращения потерь живой массы бычков при транспортировке и предубойной подготовке. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2021; 2(58): 15–19. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-58-2-15-19>
33. Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Мосолов А.А., Мирошник А.С., Мironova I.V., Shakhbazova O.P., Radzhabov R.G. Влияние новой пребиотической кормовой добавки на естественную резистентность и продуктивность свиной крупной белой породы. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2023; 3(67): 36–41. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2023-67-3-36-41>
34. Никитина Л.Т., Хабибуллин И.М., Мironova I.V., Khabibullin R.M., Galieva Z.A., Dolzhenkova G.M. Growth and development of gobies when fed drone homogenate. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2023; 37(1): 29–33. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_1_29
35. Khabibullin R.M., Mironova I.V., Derkho M.A., Strizhikov V.K., Strizhikova S.V., Denisenko A.S. Morphogenesis of the internal organs of mice with the use of adaptogens and physical activity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management*. 2020; 613: 012053. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012053>
36. Khalil A.A., Aslam A., Khalid A., Shahid Q., Aslam M., Hlebová M. Hypocholesterolemia effect of microwave assisted defatted flaxseed extract in experimental rats. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020; 10–3: 493–499.
37. Mironova I.V., Khabibullin R.M., Derkho M.A., Kontsevaya S.Yu., Strizhikova S.V., Ovchinnikova E.K. Morphological changes in the muscle tissue of mice with the use of adaptogens. *In the collection: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management"*. 2020; 012083.
30. Dementyev E.P., Bazekin G.V., Tokarev I.N., Lobodina G.V., Karimov F.A., Andreeva A.V. *et al.* The application of physical and biological stimulants in livestock breeding. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13-S10: 8325–8330. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-217-220>
31. Khabibullin R.M., Mironova I.V., Derkho M.A., Strizhikov V.K., Strizhikova S.V., Kouassi J. Morphofunctional changes in the kidneys of mice with the use of adaptogens against the background of physical exertion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management*. 2020; 613: 012052. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012052>
32. Azhmuldinov E.A., Titov M.G., Kizaev M.A., Tagirov H.H. Efficiency of using chitosan with high purity silver to reduce live weight losses in young bulls during transportation and pre-slaughter preparation. *Vestnik Bashkir state agrarian university*. 2021; 2(58): 15–19. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-58-2-15-19>
33. Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Mosolov A.A., Miroshnik A.S., Mironova I.V., Shakhbazova O.P., Radzhabov R.G. Effect of a new prebiotic feed additive on the natural resistance and productivity of Large White pigs. *Vestnik Bashkir state agrarian university*. 2023; 3(67): 36–41. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2023-67-3-36-41>
34. Nikitina L.T., Khabibullin I.M., Mironova I.V., Khabibullin R.M., Galieva Z.A., Dolzhenkova G.M. Growth and development of gobies when fed drone homogenate. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2023; 37(1): 29–33. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_1_29
35. Khabibullin R.M., Mironova I.V., Derkho M.A., Strizhikov V.K., Strizhikova S.V., Denisenko A.S. Morphogenesis of the internal organs of mice with the use of adaptogens and physical activity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management*. 2020; 613: 012053. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012053>
36. Khalil A.A., Aslam A., Khalid A., Shahid Q., Aslam M., Hlebová M. Hypocholesterolemia effect of microwave assisted defatted flaxseed extract in experimental rats. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020; 10–3: 493–499.
37. Mironova I.V., Khabibullin R.M., Derkho M.A., Kontsevaya S.Yu., Strizhikova S.V., Ovchinnikova E.K. Morphological changes in the muscle tissue of mice with the use of adaptogens. *In the collection: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management"*. 2020; 012083.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ирина Валерьевна Миронова^{1,2}
доктор биологических наук, профессор
mironova_irina-v@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5948-9563>

Рузель Муллахметович Хабибуллин¹
кандидат биологических наук, доцент
ruzel-msmk@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3437-9381>

Ильмир Муллахметович Хабибуллин¹
кандидат биологических наук, доцент
ilmir.khabibullin.91@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2117-6825>

¹ Башкирский государственный аграрный университет;
ул. 50-летия Октября, 34, Уфа, 450001, Россия

² Уфимский государственный нефтяной технический университет
ул. Космонавтов, 1, Уфа, 450064, Россия

AUTHOR INFORMATION

Irina Valeryevna Mironova^{1,2}
Doctor of Biological Sciences, Professor
mironova_irina-v@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5948-9563>

Ruzel Mullahmetovich Khabibullin¹
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
ruzel-msmk@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3437-9381>

Ilmir Mullahmetovich Khabibullin¹
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
ilmir.khabibullin.91@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2117-6825>

¹ Bashkir State Agrarian University;
34 50-letiya Oktyabrya st., Ufa, 450001, Russia

² Ufa State Petroleum Technological University
1 Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

УДК 619:615.9

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-31-38

М.А. Колбасова¹ ✉Б.В. Виолин²Е.К. Селиванова¹О.В. Проскурина³А.В. Сизюхин¹¹ООО «Научно-исследовательский институт ХимРар», Москва, Россия²Всероссийский НИИ ветеринарной санитарии, гигиены и экологии — филиал ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко Российской академии наук», Москва, Россия³ООО «Альтернатива», Старая Купавна, Московская обл., Россия

✉ kolbasova.marina@bk.ru

Поступила в редакцию: 01.12.2025

Одобрена после рецензирования: 11.12.2025

Принята к публикации: 26.01.2026

© Колбасова М.А., Виолин Б.В., Селиванова Е.К., Проскурина О.В., Сизюхин А.В.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-31-38

Marina A. Kolbasova¹ ✉Boris V. Violin²Ekaterina K. Selivanova¹Oksana V. Proskurina³Andrey V. Sizyukhin¹¹Chemrar Research and Development Institute, Limited Liability Company, Moscow, Russia²All-Russian Scientific Research Institute for Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plant — a branch of the Federal Scientific Centre VIEV, Moscow, Russia³Limited Liability Company "Alternativa", Staraya Kupavna, Moscow Region, Russia

✉ kolbasova.marina@bk.ru

Received by the editorial office: 01.12.2025

Accepted in revised: 11.12.2025

Accepted for publication: 26.01.2026

© Kolbasova M.A., Violin B.V., Selivanova E.K., Proskurina O.V., Sizyukhin A.V.

Влияние тофацитиниба при однократном и длительном применении на функциональное состояние сердечно-сосудистой системы и клиническое состояние собак: пилотное исследование

РЕЗЮМЕ

Цель исследования — первичная оценка безопасности препарата «Тофаквел» (тофацитиниба), ранее не применявшегося в ветеринарной практике, при однократном и длительном пероральном использовании у собак в рамках пилотного клинико-функционального исследования с анализом клинического состояния и параметров электрокардиографии.

Исследование проведено в два этапа. На первом этапе 5 собакам однократно вводили 10-кратную терапевтическую дозу тофацитиниба (5,4 мг/кг) с последующим 3-дневным наблюдением. На втором этапе четыре группы собак (самцы и самки) по 10 животных в каждой получали препарат ежедневно в течение 60 суток в суточной, двукратной и трехкратной суточных дозах с 10-дневным периодом постнаблюдения; одна группа служила контролем. Оценивали клиническое состояние, массу тела, потребление корма и воды, температуру тела и параметры электрокардиографии.

Однократное введение 10-кратной дозы не сопровождалось летальностью, клиническими признаками интоксикации и изменениями ЭКГ. При длительном применении во всех дозах отмечали 100%-ную выживаемость, стабильную массу тела, сохранение аппетита и нормальные показатели температуры тела. При применении двукратных и трехкратных терапевтических доз выявлены функциональные изменения ЭКГ в виде увеличения частоты сердечных сокращений и уменьшения интервала R–R при сохранении всех параметров в пределах физиологической нормы.

Ключевые слова: тофацитиниб, тофаквел, собаки, безопасность, электрокардиография, острая токсичность, субхроническая токсичность, переносимость, пилотное исследование

Для цитирования: Колбасова М.А., Виолин Б.В., Селиванова Е.К., Проскурина О.В., Сизюхин А.В. Влияние тофацитиниба при однократном и длительном применении на функциональное состояние сердечно-сосудистой системы и клиническое состояние собак: пилотное исследование. *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 31–38. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-31-38>

The effect of tofacitinib with single and prolonged use on the functional state of the cardiovascular system and the clinical condition of dogs: a pilot study

ABSTRACT

The aim of the study was to initially evaluate the safety of the drug Tofacvel (tofacitinib), which had not previously been used in veterinary practice, for single and prolonged oral administration in dogs as part of a pilot clinical and functional study analyzing the clinical condition and parameters of electrocardiography. The study was conducted in two stages. At the first stage, five dogs received a single 10-fold therapeutic dose of tofacitinib (5.4 mg/kg) followed by a 3-day observation period. At the second stage, four groups of dogs (males and females; ten animals per group) were administered the drug orally once daily for 60 days at single (1x), twofold (2x), and threefold (3x) daily doses, followed by a 10-day post-treatment observation period. One group served as the control. Clinical condition, body weight, food and water intake, body temperature, and electrocardiographic parameters were evaluated.

Single administration of the 10-fold therapeutic dose was not associated with mortality, clinical signs of intoxication, or ECG abnormalities. During repeated administration, 100% survival, stable body weight, preserved appetite, and normal body temperature were observed at all dose levels. At the two-fold and three-fold therapeutic doses, functional ECG changes were detected, including an increased heart rate and decreased R–R interval; however, all parameters remained within physiological reference ranges for dogs.

Keywords: tofacitinib, tofacvel, dogs, safety, electrocardiography, acute toxicity, subchronic toxicity, tolerability, pilot study

For citation: Kolbasova M.A., Violin B.V., Selivanova E.K., Proskurina O.V., Sizyukhin A.V. The effect of tofacitinib with single and prolonged use on the functional state of the cardiovascular system and the clinical condition of dogs: a pilot study. *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 31–38 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-31-38>

Введение/Introduction

Тофацитиниб относится к классу селективных ингибиторов янус-киназ (JAK), регулирующих внутриклеточную передачу сигналов цитокинов, участвующих в развитии воспалительных и аутоиммунных процессов [1–4]. В медицинской практике тофацитиниб широко применяется при ревматоидном артрите, псориатическом артрите, язвенном колите и ряде других иммуновоспалительных заболеваний, где продемонстрировал высокую клиническую эффективность и приемлемый профиль безопасности при длительном применении, что подтверждается данными регистрационной и оценочной документации Европейского агентства по лекарственным средствам^{1, 2} а также результатами многоцентровых клинических исследований [5–8].

В то же время, несмотря на накопленный значительный массив данных по применению тофацитиниба в медицине [9–12], сведения о его использовании в ветеринарной практике до настоящего времени остаются крайне ограниченными. Это обуславливает необходимость проведения полномасштабных доклинических исследований на целевых видах животных с обязательной оценкой системной переносимости, токсикологического профиля и влияния на жизненно важные органы и системы.

Особое значение при оценке безопасности таргетных иммуномодулирующих препаратов имеет изучение функционального состояния сердечно-сосудистой системы, поскольку ингибиторы JAK в клинической медицине ассоциированы с потенциальными кардиоваскулярными рисками при определенных условиях терапии [13–15]. В связи с этим электрокардиографический мониторинг в сочетании с клинической оценкой общего состояния животных является обязательным элементом доклинической экспертизы лекарственных средств данного класса.

Препарат «Тофаквел», содержащий тофацитиниб, ранее не применялся в ветеринарной практике, однако с учетом механизма действия и накопленного клинического опыта может рассматриваться как перспективное средство для терапии воспалительных и иммунозависимых заболеваний у собак. Перед внедрением в клиническую ветеринарную практику требуется предварительная комплексная оценка его безопасности при применении как в терапевтических, так и в повышенных дозах.

Цель настоящего пилотного исследования — первичная клиническо-функциональная оценка безопасности препарата «Тофаквел» при пероральном

введении собакам породы бигль по показателям общего клинического состояния и параметрам электрокардиографии.

Настоящая работа представляет первый этап доклинической программы и может служить обоснованием для проведения последующих расширенных токсикологических исследований, включающих гематологию, биохимию и морфологический анализ.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Объект исследования

В исследовании использовали препарат «Тофаквел» в форме таблеток, содержащих 5,4 мг тофацитиниба в одной таблетке. Для оценки острой токсичности был использован препарат серии 020325 со сроком годности до 03.2027 г., а для субхронической токсичности — серии 010325 со сроком годности до 03.2027 г.

Эксперименты проводили на 40 (4 группы по 5 самцов + 5 самок в каждой) в субхронической токсичности и на 5 самцах клинически здоровых собак породы бигль в возрасте от 1 до 4 лет обоего пола, имеющих нормальное телосложение и конституцию, массу тела 10–11 кг, отклонение по массе тела не более 10% ($10,5 \pm 0,14$ кг), без признаков гипотрофии и ожирения, в период с 18.03.2025 по 16.07.2025 (г. Старая Купавна, Россия).

Животные содержались в виварии, вольерах с минимальной площадью на животного 0,7 м² по 5 особей.

Собаки не участвовали в других исследованиях не менее чем за 30 дней до начала эксперимента.

Температура помещения во время проведения исследования составляла 21–23 °С и соответствовала требованиям ГОСТ 33217-2014³ и Руководства ЕЭК по работе с лабораторными животными⁴.

Все процедуры с животными в исследовании были рассмотрены и утверждены комиссией по уходу и использованию животных ООО «Альтернатива» на предмет соответствия этическим принципам обращения с животными. Протоколы заседания комиссии по биоэтике БЭК от 21.03.2025 № 05/2025 и от 31.03.2025 № 06/2025.

Собаки были вакцинированы против бешенства и других инфекционных болезней не менее чем за 1 месяц и не более чем за 1 год до начала эксперимента. Не менее чем за 1 месяц до исследования животные прошли дегельминтизацию и до начала введения «Тофаквела» не получали лекарственных препаратов.

¹ European Medicines Agency. Xeljanz (tofacitinib): Summary of Product Characteristics. London. 2025; 174.

² European Medicines Agency. Assessment report for Xeljanz. Procedure No. EMEA/H/C/004214/0000. London. 2017; 158.

³ ГОСТ 33217-2014 Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными хищными млекопитающими.

⁴ Руководство по работе с лабораторными (экспериментальными) животными при проведении доклинических (неклинических) исследований: рекомендация Коллегии Евразийской экономической комиссии от 14.11.2023 № 33.

Дизайн исследования

Исследование имело открытый, проспективный, контролируемый характер и включало два этапа — оценку острой и субхронической токсичности (переносимости)^{5,6}.

Настоящее исследование носило пилотный характер и было сфокусировано на клинико-функциональной оценке переносимости препарата (общее состояние животных, динамика массы тела, терморегуляция, потребление корма и воды, параметры электрокардиографии) без включения расширенного лабораторного (гематология, биохимия) и морфологического анализа. Такой подход позволяет на раннем этапе разработки препарата выявить возможные клинически значимые эффекты и определить направления последующих исследований.

Этап 1. Острая токсичность

Пять самцов собак однократно получали перорально 10-кратную терапевтическую дозу препарата, соответствующую 5,4 мг/кг тофацитиниба, что соответствовало введению 10 таблеток на животное. После введения препарата проводили непрерывное наблюдение за животными в течение 3 суток.

Этап 2. Субхроническая токсичность

«Тофаквел» относится к ветеринарным лекарственным препаратам на основе действующих веществ, ранее не применявшихся в мировой практике в области ветеринарии, но используемых в области медицины, — II группа, для которой предполагается исследование субхронической токсичности. Предполагается клиническое применение препарата в суточной дозе 1,08 мг/кг (2-кратная терапевтическая доза) в течение 2–4 недель с последующей отменой или снижением дозировки до 1 терапевтической дозы (0,54 мг/кг). Для изучения субхронической токсичности срок введения исследуемого препарата увеличен вдвое относительно максимальной продолжительности приема, а доза препарата — в 2 и 3 раза.

Таким образом, продолжительность субхронического эксперимента 2 месяца с постнаблюдением 10 сут. установлена в соответствии с требованиями для доклинических исследований токсичности оригинальных лекарственных препаратов⁵.

Во втором этапе исследования 40 собак (20 самцов и 20 самок) были рандомизированы на 4 группы по 10 животных (5 самцов и 5 самок в каждой группе), которые получали препарат в следующих дозах:

- 1-я группа (контрольная) — плацебо (2 таблетки без тофацитиниба);
- 2-я группа — суточная терапевтическая доза (ТСД): 10,8 мг на собаку в сутки (2 таблетки);

- 3-я группа — двукратная терапевтическая доза (2ТСД): 21,6 мг на собаку в сутки (4 таблетки);

- 4-я группа — трехкратная терапевтическая доза (3ТСД): 32,4 мг на собаку в сутки (6 таблеток).

Препарат вводили перорально один раз в сутки в течение 60 дней с последующим 10-дневным периодом постнаблюдения.

В ходе исследования проводили:

- ежедневный клинический осмотр (поведение, активность, состояние шерсти и слизистых оболочек);
- регистрацию летальности;
- еженедельное измерение массы тела;
- ежедневный учет потребления корма и воды;
- еженедельное измерение ректальной температуры;
- электрокардиографическое исследование.

Электрокардиография

Регистрацию электрокардиографии (ЭКГ) проводили у животных в состоянии спокойного бодрствования без применения седативных средств в положении стоя с использованием электрокардиографа «Поли-Спектр-8/В» (ООО «Нейрософт», Россия). Показатели ЭКГ снимали во II стандартном отведении при скорости записи 75 мм/с и калибровке 10 мм/мВ, фильтр изолинии 75 Гц.

Исследование проводили:

- до начала введения препарата (фон);
- через 90 мин. после 1-го, 30-го и 60-го введений.

Оценивали следующие параметры: амплитуды зубцов P, R, S, T, интервалы PQ, QRS, QT, R–R в секундах, а также частоту сердечных сокращений. Полученные значения сравнивали с референсными физиологическими диапазонами для собак.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием непараметрических критериев. Для оценки динамики показателей в пределах каждой группы (фон — 60-е сутки, постнаблюдение) применяли критерий Фридмана с последующим пост-хок (Post Hoc) анализом Данна. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Результаты представлены в виде среднего значения \pm стандартной ошибки среднего ($M \pm m$).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты исследования представлены с акцентом на показатели клинического состояния и функционального состояния сердечно-сосудистой системы, что соответствует задачам пилотного исследования.

⁵ Правила проведения доклинического исследования лекарственного средства для ветеринарного применения, клинического исследования лекарственного препарата для ветеринарного применения, исследования биоэквивалентности лекарственного препарата для ветеринарного применения (утв. приказом Минсельхоза России от 14.03.2025 № 153).

⁶ Об обращении лекарственных средств: федеральный закон от 12.04.2010 № 61-ФЗ.

На обоих этапах исследования летальных исходов зарегистрировано не было. Все животные сохраняли удовлетворительное общее состояние, нормальную двигательную активность и поведенческие реакции на протяжении всего периода наблюдения, включая 10-дневный постэкспериментальный этап. Клинических признаков интоксикации, таких как апатия, тремор, рвота, диарея или нарушения координации движений, не выявлено.

Общее состояние самцов и самок собак всех групп при клиническом наблюдении, их внешний вид и двигательная активность были удовлетворительными на протяжении всего исследования и не отличались от параллельного контроля на протяжении всего эксперимента.

Масса тела самцов и самок собак во всех экспериментальных группах на протяжении всего периода наблюдения сохранялась стабильной и статистически значимо не отличалась от фоновых значений. Все животные полностью потребляли установленную суточную норму корма (250 г на животное в сутки). Нарушений водопотребления не выявлено.

Различий между контрольной и опытными группами не отмечено.

Согласно данным таблицы 1, изменения массы тела на 60-е сутки применения препарата не носили дозозависимого характера и не отличались от показателей контрольной группы. Колебания массы тела находились в пределах физиологической вариабельности и свидетельствовали об отсутствии отрицательного влияния препарата «Тофаквел» на общее метаболическое состояние животных.

Ректальная температура тела у самцов и самок собак во всех экспериментальных группах на протяжении всего периода наблюдения находилась в пределах физиологической нормы.

Согласно данным сводной таблицы 2, статистически значимых различий между фоновыми значениями и показателями на 60-е сутки применения препарата не выявлено — как в контрольной, так и в опытных группах.

Колебания температуры носили физиологический характер и не зависели от дозы препарата. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии пирогенного и воспалительного действия препарата «Тофаквел» при длительном пероральном применении в терапевтических и повышенных дозах.

До начала эксперимента параметры ЭКГ у всех животных соответствовали физиологическим референсным значениям для собак и не различались между группами.

Данные по частоте сердечных сокращений и интервалу R–R представлены в таблице 3.

В контрольной группе статистически значимых изменений указанных параметров на протяжении эксперимента не выявлено.

При длительном применении препарата «Тофаквел» в терапевтической дозе отмечали тенденцию к увеличению ЧСС и уменьшению интервала R–R у самцов и самок собак, однако данные изменения не достигали статистической значимости по сравнению с фоновыми значениями.

В группах, получавших двукратные и трехкратные терапевтические дозы, через 60 сут. наблюдения регистрировали достоверное увеличение частоты сердечных сокращений и уменьшение

Таблица 1. Динамика массы тела собак при многократном применении препарата «Тофаквел» (в % к исходным значениям, $M \pm m$, $n = 5$)

Table 1. Dynamics of body weight in dogs during repeated administration of the drug «Tofakvel» (% of baseline values, $M \pm m$, $n = 5$)

Группа	Самцы (фон)	Самцы (60 сут.)	Самцы (постнабл.)*	Самки (фон)	Самки (60 сут.)	Самки (постнабл.)*
Плацебо	100,0 \pm 0,0	101,7 \pm 0,9	101,2 \pm 0,7	100,0 \pm 0,0	101,7 \pm 0,8	101,4 \pm 0,6
ТСД	100,0 \pm 0,0	99,8 \pm 1,1	100,0 \pm 0,6	100,0 \pm 0,0	100,8 \pm 1,3	100,6 \pm 0,5
2ТСД	100,0 \pm 0,0	101,4 \pm 1,3	101,2 \pm 1,4	100,0 \pm 0,0	102,1 \pm 0,4	101,4 \pm 0,6
3ТСД	100,0 \pm 0,0	100,0 \pm 1,5	100,2 \pm 1,0	100,0 \pm 0,0	100,0 \pm 1,3	100,5 \pm 1,0

Примечание: * 10 суток после отмены препарата.

Таблица 2. Динамика температуры тела у собак [21] при многократном применении препарата «Тофаквел» ($^{\circ}\text{C}$, $M \pm m$, $n = 5$)

Table 2. Dynamics of body temperature in dogs [21] with repeated use of the drug «Tofakvel» ($^{\circ}\text{C}$, $M \pm m$, $n = 5$)

Группа	Самцы (фон)	Самцы (60 сут.)	Самцы (постнабл.)*	Самки (фон)	Самки (60 сут.)	Самки (постнабл.)*
Плацебо	38,85 \pm 0,15	38,70 \pm 0,25	38,90 \pm 0,21	38,70 \pm 0,44	37,90 \pm 0,34	38,10 \pm 0,34
ТСД	38,70 \pm 0,23	38,33 \pm 0,13	38,63 \pm 0,10	38,38 \pm 0,34	38,65 \pm 0,38	38,53 \pm 0,38
2ТСД	38,95 \pm 0,17	38,85 \pm 0,15	38,65 \pm 0,15	39,00 \pm 0,44	38,30 \pm 0,34	38,10 \pm 0,34
3ТСД	38,80 \pm 0,08	38,93 \pm 0,10	38,70 \pm 0,12	38,95 \pm 0,33	38,28 \pm 0,32	38,00 \pm 0,34

Примечание: * 10 суток после отмены препарата.

интервала R–R по сравнению с фоновыми показателями ($p \leq 0,05$). При этом все зарегистрированные значения оставались в пределах физиологического диапазона, характерного для данного вида животных, и сопоставимы с опубликованными референсными значениями для собак породы бигль.

Анализ интервала QT показал отсутствие статистически значимых изменений у самцов и самок собак во всех дозовых группах — как в динамике наблюдения, так и по сравнению с контрольной группой.

Полученные значения находились в пределах референсных физиологических значений. Амплитуды зубцов P, R, S и T, а также интервалы PQ и QRS у животных всех групп на протяжении эксперимента не выходили за пределы физиологической нормы и статистически значимо не отличались от контрольных значений (табл. 4).

Таким образом, выявленные изменения ЭКГ при применении повышенных доз препарата носили функциональный характер, не сопровождались клиническими признаками сердечно-сосудистой недостаточности и не свидетельствовали о кардиотоксическом действии препарата «Тофаквел».

Полученные данные отражают результаты плотного клинико-функционального исследования, сфокусированного на оценке общего клинического состояния и электрокардиографических параметров у собак при применении препарата «Тофаквел». Такой подход позволяет на раннем этапе разработки выявить возможные клинически значимые эффекты со стороны сердечно-сосудистой системы и служит основой для планирования

последующих этапов доклинической программы.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком запасе безопасности препарата «Тофаквел» при однократном и многократном пероральном применении у собак.

Отсутствие летальных исходов и клинических признаков интоксикации при введении 10-кратной разовой дозы указывает на низкий риск острой токсичности тофацитиниба для данного вида животных.

Стабильность массы тела, аппетита, потребления воды и температуры тела подтверждает отсутствие выраженного системного токсического воздействия препарата при курсовом применении в терапевтических и повышенных дозах. Эти данные особенно важны в контексте возможного длительного использования препарата в клинической ветеринарной практике.

Отдельного внимания заслуживает состояние сердечно-сосудистой системы. Несмотря на достоверное увеличение ЧСС и уменьшение интервала R–R при применении двукратных и трехкратных терапевтических доз, все зарегистрированные параметры ЭКГ носили умеренный характер и находились в пределах референсных диапазонов, описанных для биглей. Это указывает на функциональный, а не патологический характер выявленных изменений и свидетельствует об отсутствии клинически значимого кардиотоксического эффекта, что позволяет рассматривать выявленные изменения как адаптационную реакцию, а не проявление кардиотоксичности.

Наблюдаемые изменения могут быть рассмотрены с позиций модуляции JAK-STAT-сигнализации в сердечно-сосудистой системе. Известно,

Таблица 3. Динамика частоты сердечных сокращений (уд/мин) и интервала R–R (сек.) у собак при многократном применении препарата «Тофаквел» ($M \pm m$, $n = 5$)

Table 3. Dynamics of heart rate (beats/minute) and R–R interval (seconds) in dogs with repeated administration of the drug «Tofakvel» ($M \pm m$, $n = 5$)

Группа	Самцы ЧСС (фон)	Самцы ЧСС (60 сут.)	Самцы R–R (фон)	Самцы R–R (60 сут.)	Самки ЧСС (фон)	Самки ЧСС (60 сут.)	Самки R–R (фон)	Самки R–R (60 сут.)
Плацебо	88,4 ± 9,2	92,8 ± 4,6	0,762 ± 0,074	0,653 ± 0,030	86,4 ± 6,9	102,4 ± 3,6	0,716 ± 0,065	0,589 ± 0,020
ТСД	104,6 ± 14,1	115,8 ± 7,2	0,622 ± 0,090	0,526 ± 0,035	95,4 ± 11,5	106,6 ± 10,8	0,706 ± 0,071	0,583 ± 0,049
2ТСД	89,2 ± 11,3	97,8 ± 8,3	0,720 ± 0,092	0,630 ± 0,048	85,2 ± 8,6	98,0 ± 3,8*	0,793 ± 0,054	0,618 ± 0,022*
3ТСД	90,8 ± 9,1	100,8 ± 9,0	0,719 ± 0,048	0,614 ± 0,054	85,2 ± 4,5	108,2 ± 7,7*	0,712 ± 0,04	0,568 ± 0,043*

Примечание: * статистически значимо относительно фоновых показателей ($p \leq 0,05$).

Таблица 4. Интервалы QT (сек.) у собак при многократном применении препарата «Тофаквел» ($M \pm m$, $n = 5$)

Table 4. QT intervals (seconds) in dogs with repeated administration of the drug «Tofakvel» ($M \pm m$, $n = 5$)

Группа	Самцы QT (фон)	Самцы QT (60 сут.)	Самки QT (фон)	Самки QT (60 сут.)
Плацебо	0,216 ± 0,009	0,218 ± 0,003	0,202 ± 0,007	0,215 ± 0,007
ТСД	0,191 ± 0,007	0,201 ± 0,003	0,204 ± 0,006	0,213 ± 0,011
2ТСД	0,205 ± 0,010	0,213 ± 0,003	0,213 ± 0,008	0,213 ± 0,005
3ТСД	0,214 ± 0,008	0,226 ± 0,010	0,211 ± 0,006	0,209 ± 0,005

что STAT-зависимые сигнальные пути играют ключевую роль в регуляции воспалительного ответа, клеточной выживаемости и процессов ремоделирования миокарда, а STAT3 рассматривается как один из центральных факторов кардиопротекции [16].

JAK2-STAT3-сигнализация участвует во взаимодействии иммунной и вегетативной нервной систем, опосредуя влияние воспалительных медиаторов на нейрогуморальную регуляцию сердечной деятельности, что подтверждено экспериментальными моделями воспалительного поражения миокарда [17].

В связи с этим фармакологическое ингибирование JAK-опосредованной активации STAT3 под действием тофацитиниба может сопровождаться функциональными изменениями хронотропной регуляции, не выходящими за пределы физиологической адаптации.

Выявленное в настоящем исследовании умеренное увеличение частоты сердечных сокращений при сохранении нормальных параметров ЭКГ укладывается в данную концепцию и не свидетельствует о развитии электрической или структурной нестабильности миокарда.

Следует подчеркнуть, что в клинических исследованиях кардиоваскулярные риски, ассоциированные с применением тофацитиниба, связывают преимущественно с атеротромботическими событиями у пациентов с ревматоидным артритом и исходными факторами сердечно-сосудистого риска [18, 19]. При этом данные о прямом аритмогенном или кардиотоксическом действии препарата отсутствуют.

Таким образом, функциональные изменения ЭКГ, выявленные у клинически здоровых собак в настоящем исследовании, не противоречат результатам медицинских наблюдений и не свидетельствуют о развитии патологического поражения миокарда.

Отсутствие клинических проявлений сердечной недостаточности, нарушений ритма и признаков декомпенсации позволяет рассматривать выявленные изменения как адаптационные и обратимые, что согласуется с представлениями о преимущественно кардиопротективной роли STAT3-сигналинга в интактном миокарде [16]. Следовательно, применение тофацитиниба в терапевтических и повышенных дозах у здоровых собак не сопровождается клинически значимым неблагоприятным влиянием на сердечно-сосудистую систему.

Сохранение амплитуд зубцов P, R, S и T, а также интервалов PQ и QRS в пределах физиологических референсных значений подтверждает, что выявленные изменения ЭКГ носят изолированный и функциональный характер и не сопровождаются нарушением атриовентрикулярной проводимости или внутрисердечной деполяризации.

С позиций молекулярных механизмов данные изменения могут быть объяснены модуляцией

JAK-STAT-сигнализации в сердечно-сосудистой системе. STAT3 рассматривается как один из ключевых факторов кардиопротекции и регуляции адаптационных реакций миокарда [20], а JAK2-STAT3-сигнализация участвует во взаимодействии иммунной и вегетативной нервной систем, опосредуя влияние воспалительных медиаторов на нейрогуморальную регуляцию сердечной деятельности [17]. Экспериментальные данные свидетельствуют о способности IL-6 модифицировать электрофизиологические свойства кардиомиоцитов, в том числе процессы реполяризации, особенно в условиях фармакологического воздействия [19].

В связи с этим фармакологическое ингибирование JAK1/3 под действием тофацитиниба может сопровождаться дозозависимыми функциональными изменениями хронотропной регуляции, проявляющимися умеренным учащением сердечного ритма при сохранении других параметров ЭКГ в физиологических пределах. Отсутствие нарушений ритма, удлинения интервала QT и клинических признаков сердечно-сосудистой недостаточности позволяет рассматривать выявленные изменения как адаптационные и обратимые.

Следует отметить, что в клинических исследованиях кардиоваскулярные риски тофацитиниба ассоциированы преимущественно с атеротромботическими событиями при длительной терапии у пациентов с исходными факторами риска, а не с прямым аритмогенным или кардиотоксическим действием препарата [18]. Это полностью согласуется с функциональным, а не патологическим характером выявленных в настоящем исследовании электрокардиографических изменений.

Результаты во многом согласуются с данными медицинских исследований, в которых отмечаются функциональные изменения сердечного ритма без выраженных клинических проявлений [14, 15]. В настоящей работе у собак не выявлено патологических нарушений ЭКГ.

Полученные данные подтверждают, что препарат при корректном дозировании обладает хорошей переносимостью. Вместе с тем именно отсутствие предшествующего опыта применения тофацитиниба в ветеринарии подчеркивает ценность настоящего исследования как одного из первых этапов научного обоснования возможности его использования у собак.

Таким образом, комплексная оценка клинического состояния и параметров ЭКГ показала, что тофацитиниб в составе препарата «Тофаквел» не оказывает неблагоприятного влияния на сердечно-сосудистую систему собак даже при длительном применении в повышенных дозах.

Ограничениями настоящей работы являются ее пилотный характер и фокус на клинических и электрокардиографических показателях без включения расширенных лабораторных (гематология, биохимия) и морфологических исследований. Вместе с тем отсутствие неблагоприятных

клинических проявлений и клинически значимых изменений ЭКГ при однократном введении 10-кратной дозы и курсовом применении терапевтических и повышенных доз создает основу для последующих этапов доклинической программы, включающих комплексную токсикологическую оценку и исследования эффективности препарата.

Выводы/Conclusions

1. В рамках пилотного исследования препарата «Тофаквел» (тофацитиниб) не проявляет признаков острой токсичности при однократном пероральном введении собакам в 10-кратной терапевтической дозе по данным клинического наблюдения и ЭКГ.

2. Курсовое (60 сут.) применение препарата в терапевтической, двукратной и трехкратной терапевтической дозах не приводит к ухудшению

клинического состояния животных, снижению массы тела, нарушению аппетита и показателей терморегуляции.

3. Выявленные при многократном применении повышенных доз изменения ЭКГ (увеличение ЧСС и укорочение интервала R–R) носили функциональный характер, не выходили за пределы физиологических норм и не сопровождались клиническими признаками сердечно-сосудистой недостаточности, что свидетельствует об отсутствии клинически значимого кардиотоксического эффекта.

4. Полученные результаты позволяют рассматривать тофацитиниб в составе препарата «Тофаквел» как перспективное средство для дальнейшего изучения в составе расширенной доклинической программы, направленной на оценку безопасности, эффективности и возможности применения в ветеринарной клинической практике.

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

- Huang D., Zhang Y., Kong L., Lu J., Shi Y. Janus kinase inhibitors in autoimmune bullous diseases. *Frontiers in Immunology*. 2023; 14: 1220887. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1220887>
- Ghoreschi K., Laurence A., O'Shea J.J. Janus kinases in immune cell signaling. *Immunological Reviews*. 2009; 228(1): 273–287. <https://doi.org/10.1111/j.1600-065X.2008.00754.x>
- Banerjee S., Biehl A., Gadina M., Hasni S., Schwartz D.M. JAK-STAT Signaling as a Target for Inflammatory and Autoimmune Diseases: Current and Future Prospects. *Drugs*. 2017; 77(5): 521–546. <https://doi.org/10.1007/s40265-017-0701-9>
- Schwartz D.M., Kanno Y., Villarino A., Ward M., Gadina M., O'Shea J.J. JAK inhibition as a therapeutic strategy for immune and inflammatory diseases. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2017; 16(12): 843–862. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.201>
- Schregel I., Ramos G.P., Ioannou S., Culver E., Färkkilä M., Schramm C. Evaluation of Tofacitinib in Primary Sclerosing Cholangitis and Associated Colitis: A Multicenter, Retrospective Study. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*. 2023; 21(13): 3448–3450. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2023.01.014>
- Fleischmann R. et al. Placebo-Controlled Trial of Tofacitinib Monotherapy in Rheumatoid Arthritis. *The New England Journal of Medicine*. 2012; 367(6): 495–507. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1109071>
- Burmester G.R. et al. Tofacitinib (CP-690,550) in combination with methotrexate in patients with active rheumatoid arthritis with an inadequate response to tumour necrosis factor inhibitors: a randomised phase 3 trial. *The Lancet*. 2013; 381(9865): 451–460. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(12\)61424-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(12)61424-x)
- Sandborn W.J. et al. Tofacitinib as Induction and Maintenance Therapy for Ulcerative Colitis. *The New England Journal of Medicine*. 2017; 376(18): 1723–1736. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1606910>
- Баранова Т.А., Игнатенко М.А., Выкова Б.А., Александров Т.Л., Сергеева К.А. Сравнительная оценка эффективности упадацинитоба и тофацитиноба в течение одного года при язвенном колите в реальной клинической практике. *Колопроктология*. 2025; 24(2): 42–51. <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2025-24-2-42-51>
- Новикова Л.А. и др. Место и роль ингибитора янус-киназы тофацитиноба в терапии псориазического артрита. *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2025; (2): 74–78. <https://doi.org/10.48612/cgma/7p9k-z78v-f1pz>
- Dai Q. et al. Efficacy and safety of tofacitinib for chronic plaque psoriasis and psoriatic arthritis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Rheumatology*. 2024; 43(5): 1605–1613. <https://doi.org/10.1007/s10067-024-06940-5>

REFERENCES

- Huang D., Zhang Y., Kong L., Lu J., Shi Y. Janus kinase inhibitors in autoimmune bullous diseases. *Frontiers in Immunology*. 2023; 14: 1220887. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1220887>
- Ghoreschi K., Laurence A., O'Shea J.J. Janus kinases in immune cell signaling. *Immunological Reviews*. 2009; 228(1): 273–287. <https://doi.org/10.1111/j.1600-065X.2008.00754.x>
- Banerjee S., Biehl A., Gadina M., Hasni S., Schwartz D.M. JAK-STAT Signaling as a Target for Inflammatory and Autoimmune Diseases: Current and Future Prospects. *Drugs*. 2017; 77(5): 521–546. <https://doi.org/10.1007/s40265-017-0701-9>
- Schwartz D.M., Kanno Y., Villarino A., Ward M., Gadina M., O'Shea J.J. JAK inhibition as a therapeutic strategy for immune and inflammatory diseases. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2017; 16(12): 843–862. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.201>
- Schregel I., Ramos G.P., Ioannou S., Culver E., Färkkilä M., Schramm C. Evaluation of Tofacitinib in Primary Sclerosing Cholangitis and Associated Colitis: A Multicenter, Retrospective Study. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*. 2023; 21(13): 3448–3450. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2023.01.014>
- Fleischmann R. et al. Placebo-Controlled Trial of Tofacitinib Monotherapy in Rheumatoid Arthritis. *The New England Journal of Medicine*. 2012; 367(6): 495–507. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1109071>
- Burmester G.R. et al. Tofacitinib (CP-690,550) in combination with methotrexate in patients with active rheumatoid arthritis with an inadequate response to tumour necrosis factor inhibitors: a randomised phase 3 trial. *The Lancet*. 2013; 381(9865): 451–460. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(12\)61424-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(12)61424-x)
- Sandborn W.J. et al. Tofacitinib as Induction and Maintenance Therapy for Ulcerative Colitis. *The New England Journal of Medicine*. 2017; 376(18): 1723–1736. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1606910>
- Baranova T.A., Ignatenko M.A., Vykova B.A., Alexandrov T.L., Sergeeva K.A. Effectiveness of upadacitinib and tofacitinib for one year in ulcerative colitis in real clinical practice. *Koloproktologia*. 2025; 24(2): 42–51 (in Russian). <https://doi.org/10.33878/2073-7556-2025-24-2-42-51>
- Novikova L.A. et al. The place and role of the Janus kinase inhibitor tofacitinib in the treatment of psoriatic arthritis. *Kremlin Medicine. Clinical Bulletin [Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik]*. 2025; (2): 74–78 (in Russian). <https://doi.org/10.48612/cgma/7p9k-z78v-f1pz>
- Dai Q. et al. Efficacy and safety of tofacitinib for chronic plaque psoriasis and psoriatic arthritis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Rheumatology*. 2024; 43(5): 1605–1613. <https://doi.org/10.1007/s10067-024-06940-5>

12. Логинова Е.Ю. и др. Эффективность и безопасность тофацитиниба у больных псориазическим артритом в реальной клинической практике. *Научно-практическая ревматология*. 2020; 58(3): 268–275.
<https://doi.org/10.14412/1995-4484-2020-268-275>
13. Winthrop K.L. et al. Herpes Zoster and Tofacitinib: Clinical Outcomes and the Risk of Concomitant Therapy. *Arthritis & Rheumatology*. 2017; 69(10): 1960–1968.
<https://doi.org/10.1002/art.40189>
14. Charles-Schoeman C. et al. Cardiovascular safety findings in patients with rheumatoid arthritis treated with tofacitinib, an oral Janus kinase inhibitor. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*. 2016; 46(3): 261–271.
<https://doi.org/10.1016/j.semarthrit.2016.05.014>
15. Ytterberg S.R. et al. Cardiovascular and Cancer Risk with Tofacitinib in Rheumatoid Arthritis. *The New England Journal of Medicine*. 2022; 386(4): 316–326.
<https://doi.org/10.1056/nejmoa2109927>
16. Kishore R., Verma S.K. Roles of STATs signaling in cardiovascular diseases. *JAK-STAT*. 2012; 1(2): 118–124.
<https://doi.org/10.4161/jkst.20115>
17. Park H. et al. Sympathetic nerve blocks promote anti-inflammatory response by activating the JAK2-STAT3-mediated signaling cascade in rat myocarditis models: A novel mechanism with clinical implications. *Heart Rhythm*. 2018; 15(5): 770–779.
<https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2017.09.039>
18. Khosrow-Khavar F., Kim S. C., Lee H., Lee S.B., Desai R.J. Tofacitinib and risk of cardiovascular outcomes: results from the Safety of Tofacitinib in Routine care patients with Rheumatoid Arthritis (STAR-RA) study. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 2022; 81(6): 798–804.
<https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2021-221915>
19. Tasso M. et al. Assessing cardiovascular risk in rheumatoid arthritis patients on Janus kinase inhibitors: real-world data from the European Alliance of Associations for Rheumatology-adapted CUORE risk algorithm. *Reumatologia*. 2025; 63(4): 281–283.
<https://doi.org/10.5114/reum/207507>
20. Zhu X. et al. Arrhythmogenic mechanisms of interleukin-6 combination with hydroxychloroquine and azithromycin in inflammatory diseases. *Scientific Reports*. 2022; 12: 1075.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-04852-5>

ОБ АВТОРАХ

Марина Андреевна Колбасова¹

магистр ветеринарно-санитарных наук, руководитель отдела национальных продаж компании
Kolbasova.marina@bk.ru

Борис Викторович Виолин²

кандидат ветеринарных наук, научный консультант
agrovetpress@inbox.ru

Екатерина Константиновна Селиванова¹

кандидат биологических наук, заведующая лабораторией
blamanche@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2732-3726>

Оксана Владимировна Проскурина³

исполнительный директор
proskurina_ov@mail.ru

Андрей Владимирович Сизюхин¹

генеральный директор
sa@iihr.ru

¹Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт “ХимПар”», бульвар Большой, 40, эт./пом. 3/XXXIII, ком. 86, внутригородская территория муниципального округа Можайский, территория инновационного центра «Сколково», Москва, 121205, Россия

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

³Общество с ограниченной ответственностью «Альтернатива», ул. Цветочная, 28, пом. 1, Московская обл., Богородский г. о., Старая Купавна, 142450, Россия

12. Loginova E.Yu. et al. Efficacy and safety of tofacitinib in patients with psoriatic arthritis in real clinical practice. *Scientific and practical rheumatology*. 2020; 58(3): 268–275 (in Russian)
<https://doi.org/10.14412/1995-4484-2020-268-275>

13. Winthrop K.L. et al. Herpes Zoster and Tofacitinib: Clinical Outcomes and the Risk of Concomitant Therapy. *Arthritis & Rheumatology*. 2017; 69(10): 1960–1968.
<https://doi.org/10.1002/art.40189>

14. Charles-Schoeman C. et al. Cardiovascular safety findings in patients with rheumatoid arthritis treated with tofacitinib, an oral Janus kinase inhibitor. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*. 2016; 46(3): 261–271.
<https://doi.org/10.1016/j.semarthrit.2016.05.014>

15. Ytterberg S.R. et al. Cardiovascular and Cancer Risk with Tofacitinib in Rheumatoid Arthritis. *The New England Journal of Medicine*. 2022; 386(4): 316–326.
<https://doi.org/10.1056/nejmoa2109927>

16. Kishore R., Verma S.K. Roles of STATs signaling in cardiovascular diseases. *JAK-STAT*. 2012; 1(2): 118–124.
<https://doi.org/10.4161/jkst.20115>

17. Park H. et al. Sympathetic nerve blocks promote anti-inflammatory response by activating the JAK2-STAT3-mediated signaling cascade in rat myocarditis models: A novel mechanism with clinical implications. *Heart Rhythm*. 2018; 15(5): 770–779.
<https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2017.09.039>

18. Khosrow-Khavar F., Kim S. C., Lee H., Lee S.B., Desai R.J. Tofacitinib and risk of cardiovascular outcomes: results from the Safety of Tofacitinib in Routine care patients with Rheumatoid Arthritis (STAR-RA) study. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 2022; 81(6): 798–804.
<https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2021-221915>

19. Tasso M. et al. Assessing cardiovascular risk in rheumatoid arthritis patients on Janus kinase inhibitors: real-world data from the European Alliance of Associations for Rheumatology-adapted CUORE risk algorithm. *Reumatologia*. 2025; 63(4): 281–283.
<https://doi.org/10.5114/reum/207507>

20. Zhu X. et al. Arrhythmogenic mechanisms of interleukin-6 combination with hydroxychloroquine and azithromycin in inflammatory diseases. *Scientific Reports*. 2022; 12: 1075.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-04852-5>

ABOUT THE AUTHORS

Marina Andreevna Kolbasova¹

Master of Veterinary and Sanitary Sciences, Head of National Sales Department
Kolbasova.marina@bk.ru

Boris Viktorovich Violin²

Candidate of Veterinary Sciences, Scientific Consultant
agrovetpress@inbox.ru

Ekaterina Konstantinovna Selivanova¹

Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory
blamanche@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2732-3726>

Oksana Vladimirovna Proskurina³

Executive Director
proskurina_ov@mail.ru

Andrey Vladimirovich Sizyukhin¹

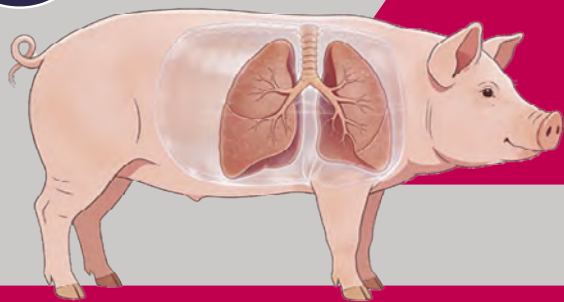
General Director
sa@iihr.ru

¹Chemrar Research and Development Institute, Limited Liability Company
40 Floor/Room 3/XXXIII, 86 Room, Bolshoy Boulevard, Building Intra-City Territory of the Mozhaisky Municipal District, “Skolkovo” Innovation Center Territory, Moscow, 121205, 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

³Limited Liability Company “Alternativa”,

28/1 Tsvetochnaya St., Staraya Kupavna, Bogorodsky Urban District, Moscow Region, 142450, Russia

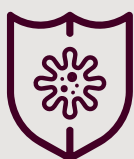


ПУЛЬМОКИТ – КРЕПКИЕ ЛЁГКИЕ СТАДА

Уверенный контроль АПП и респираторных инфекций при минимальном риске резистентности

ОДИН ПРЕПАРАТ – НЕСКОЛЬКО ЭФФЕКТОВ:

антибактериальное, противовоспалительное, жаропонижающее, анальгезирующее, иммуностимулирующее и постантибиотическое действие в одной схеме применения.



Эффективен против всех серотипов
Actinobacillus pleuropneumoniae



Экономика лечения под контролем
Ускоряет выздоровление, снижает потери привеса и выбраковку туш



Расширенный профиль действия
Действует против основных возбудителей респираторных и кишечных инфекций



О ПРОДУКТЕ

Реклама

+7 495 777-67-67

vicgroup.ru

УДК 636.086

Научный обзор



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-40-59

Я.М. Ребезов¹ ✉

М.Б. Ребезов²

У.Ю. Медведева¹

¹Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Новгород, Россия

²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

✉ yaroslavreb@yandex.ru

Поступила в редакцию: 02.11.2025

Одобрена после рецензирования: 11.11.2025

Принята к публикации: 26.01.2026

© Ребезов Я.М., Ребезов М.Б.,
Медведева У.Ю.

Перспектива применения лактоферрина в животноводстве

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Лактоферрин — это природный катионный железосвязывающий гликопротеин из группы трансферринов. Будучи важным компонентом врожденного иммунитета, лактоферрин представляет собой multifunctional белок с широким спектром биологической активности. Лактоферрин активно применяется в фармацевтике и имеет потенциал применения в животноводстве.

Методы. Поиск потенциально релевантных статей проводили по ключевым словам в электронных базах данных и открытом доступе сети Интернет.

Результаты. Анализ литературных данных выявил противомикробную, противогрибковую, противовирусную и иммуномодулирующую активность лактоферрина. Лактоферрин находит всё более широкое применение в сфере животноводства и ветеринарии, однако сложность получения и очистки тормозит этот процесс.

Перспективными являются разработка и внедрение биологически активных добавок с лактоферрином, направленных на иммунокоррекцию, и укрепление организма сельскохозяйственных животных. Лактоферрин может быть использован в качестве вещества для создания лечебного средства в ветеринарии.

Кроме того, обширные возможности могут быть получены для отрасли при создании стад трансгенных животных биоаналога лактоферрина человека.

Ключевые слова: лактоферрин, неолактоферрин, иммунная система, трансгенные животные, молоко

Для цитирования: Ребезов Я.М., Ребезов М.Б., Медведева У.Ю. Перспектива применения лактоферрина в животноводстве. *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 40–59. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-40-59>

Review



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-40-59

Yaroslav M. Rebezov¹ ✉

Maksim B. Rebezov²

Ulyana Yu. Medvedeva¹

¹Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

²Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

✉ yaroslavreb@yandex.ru

Received by the editorial office: 02.11.2025

Accepted in revised: 11.11.2025

Accepted for publication: 26.01.2026

© Rebezov Ya.M., Rebezov M.B.,
Medvedeva U.Yu.

Prospects for the use of lactoferrin in animal husbandry

ABSTRACT

Relevance. Lactoferrin is a natural cationic iron-binding glycoprotein from the transferrin group. An important component of innate immunity, lactoferrin is a multifunctional protein with a broad spectrum of biological activity. Lactoferrin is widely used in pharmaceuticals and has potential application in animal husbandry.

Methods. The search for potentially relevant articles was carried out by keywords in electronic databases and open Internet access.

Results. A literature review revealed the antimicrobial, antifungal, antiviral, and immunomodulatory activity of lactoferrin. Lactoferrin is increasingly used in animal husbandry and veterinary medicine; however, the complexity of its production and purification hinders this process. The development and introduction of lactoferrin-based dietary supplements aimed at immunocorrection and strengthening the body of farm animals is promising. Lactoferrin can be used as a substance for the creation of a therapeutic agent in veterinary medicine. In addition, extensive opportunities could be created for the industry by creating herds of transgenic animals producing a biosimilar to human lactoferrin.

Key words: lactoferrin, neo-lactoferrin, immune system, transgenic animals, milk

For citation: Rebezov Ya.M., Rebezov M.B., Medvedeva U.Yu. Prospects for the use of lactoferrin in animal husbandry. *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 40–59 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-40-59>

Введение/Introduction

Животноводство, как отрасль, является основным источником сырья для оптимального питания человека, и совершенствование методов животноводства должно быть одним из основных направлений развития АПК России. В связи с этим в отрасли постоянно идут поиски новшеств для решения актуальных задач, таких как предотвращение болезней, скорость роста и увеличение живой массы, сокращение расходов на кормление [1–4].

Способами предотвращения болезней у животных и уменьшения их распространения служат профилактика и усиление ответных защитных механизмов организма, что в свою очередь благоприятно сказывается на его развитии. В связи с этим важными представляются определение и исследование биоактивных компонентов, воздействие которых ориентировано на укрепление организма. Одним из таких компонентов может служить лактоферрин [1, 5].

Лактоферрин — это природный катионный железосвязывающий гликопротеин из группы трансферринов [6, 7]. Будучи важным компонентом врожденного иммунитета, лактоферрин представляет собой многофункциональный белок с широким спектром биологической активности. Его функции не ограничиваются прямым воздействием на инфекционные агенты. Выступая в роли иммуномодулятора, он регулирует пролиферацию и дифференциацию различных иммунокомпетентных клеток. К его свойствам относятся антиоксидантный эффект, контроль над воспалительными процессами и поддержание гомеостаза [1, 6–8].

Будучи впервые обнаруженным в молоке коров в 1939 году и идентифицированным как железосвязывающий белок, лактоферрин впоследствии был выделен из женского грудного молока и коровьего молока в 1960 году, что позволило разработать методики его получения из молока других млекопитающих [1, 5, 7]. В настоящее время установлен аминокислотный состав данного белка, выделенного из молока свиньи, мыши, овцы, кобылы, верблюда, козы, буйволицы, а также из грудного молока человека [5, 9, 10]. Например, лактоферрин человека и крупного рогатого скота содержат 691 и 696 аминокислот соответственно [10]. Лактоферрин обнаружен у многих млекопитающих, его большая часть в организме во всех случаях приходится на молоко.

Помимо молока, лактоферрин в значительных количествах секретируется в составе различных биологических жидкостей, таких как слезы, слюна, вагинальный и семенной секрет, бронхиальный и назальный секреты, желчь, жидкости желудочно-кишечного тракта и моча. Кроме того, его существенная концентрация обнаруживается в нейтрофильных гранулоцитах периферической крови, а также в околоплодных водах [6, 7, 11].

По своему строению лактоферрин относится к группе белков трансферринов. Молекулярная масса лактоферрина составляет от 78 до 80 кДа,

и он состоит из одной полипептидной цепи, которая может быть разделена на две гомологичные части, общая длина цепи составляет от 680 до 700 аминокислот [1, 6, 11]. Гомологичные половины образуют глобулярные доли — С-доли (аминокислотные остатки 345–676) и N-доли (аминокислотные остатки 1–333), соединенные спиральным участком (остатки 334–344) из 11 аминокислот, формирующим подвижную трехвитковую α -спираль. Молекула белка несимметрична [1, 12]. Молекула лактоферрина способна обратимо связывать свободные ионы Fe^{3+} и Fe^{2+} [6, 11].

Будучи синтезированным в железистых клетках эпителиальных тканей, лактоферрин обнаруживается в молоке, слюне и других секретах, тогда как лактоферрин, присутствующий в сыворотке крови, продуцируется нейтрофилами. При этом установлено, что экскреторный и сывороточный лактоферрины обладают идентичными физико-химическими и иммунохимическими характеристиками [1, 13]. Структура человеческого лактоферрина гомологична на 69% структуре коровьего трансферрина и на 70% — мышинного. Обнаружено сходство (59%) между человеческим лактоферрином и его сывороточным трансферрином, содержащимся в крови того же организма [5, 9, 14, 15].

Молозиво человека и животных содержит более высокие концентрации лактоферрина, чем цельное молоко. Сообщается, что концентрация лактоферрина в молозиве может достигать 7 мг/мл. Концентрация лактоферрина в цельном молоке животных обычно меньше, чем в грудном молоке человека (2–3 г/л) [1, 12, 16–18] (табл. 1).

Лактоферрин широко распространен в различных тканях. Его участие в различных физиологических процессах обусловлено выраженной способностью к комплексообразованию, что определяет широкий спектр биологических свойств, включая фунгицидную, бактерицидную (в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий), бактериостатическую и иммуномодулирующую активность. Всё это позволяет относить его к многофункциональным белкам [5, 27].

Лактоферрин способен связываться с различными лигандами — ДНК, РНК, лизоцимом,

Таблица 1. Источники и концентрация лактоферрина в различных типах молока и молозива

Table 1. Sources and concentrations of lactoferrin in different types of milk and colostrum

Тип молока (молозива)	Концентрация лактоферрина, мг/мл	Источник
Грудное молоко человека	2–3	19
Коровье молоко	0,1–1,5	20
Козье молоко	0,2–2,2	21
Овечье молоко	0,5–2,5	22
Верблюжье молоко	0,4–3,3	23
Грудное молозиво человека	5,80	24
Коровье молозиво	0,82	25
Верблюжье молозиво	0,81	26
Козье молозиво	0,39	21

белками-рецепторами, протеогликанами, гепарином и другими соединениями [28]. Такая способность к множественным молекулярным взаимодействиям обуславливает его исключительную полифункциональность и участие во множестве ключевых биологических процессов организма [29].

Основной проблемой распространения трансгенного лактоферрина являются крайне низкий выход продукта и сложная многоступенчатая процедура очистки. Это существенно повышает затраты и, соответственно, замедляет данное развитие направления. Основным источником лактоферрина — грудное женское молоко, которое является дефицитным источником [1, 5–7]. В связи с этим идет постоянный поиск возможных источников лактоферрина. Рассматриваются потенциал молочной сыворотки, которая в настоящее время является побочным продуктом молочной индустрии [1], и молоко трансгенных коров и коз [11, 30, 31].

Существуют несколько методов выделения лактоферрина: химический с использованием сульфатных соединений, сорбционный с применением полисахаридов, ионообменная и аффинная хроматография, а также электродиализ с фильтрационной мембраной [1, 32]. На практике наибольшее распространение получили хроматографические методы — преимущественно ионообменная и аффинная хроматография [1, 33]. Наиболее удобной и стабильной формой лактоферрина является порошкообразная [1, 32].

В настоящее время производство лактоферрина из молока крупного рогатого скота осуществляется рядом компаний, а объем мирового рынка лактоферрина оценивался в 293 млн долл. США¹.

Цели настоящей работы — выявление и изучение данных о возможностях применения лактоферрина в животноводстве.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Поиск литературы проводили без ограничений по дате публикации, типу источника и языку исследования. Поиск потенциально релевантных материалов осуществляли по ключевым словам в электронных базах данных Scopus², Sci-Hub³, PubMed⁴ и eLibrary.ru⁵, Google Scholar⁶, Science Direct⁷ и источникам в открытом доступе сети Интернет. Были изучены списки литературы отобранных публикаций для выявления дополнительных релевантных источников информации.

Статьи были проанализированы, чтобы оценить и систематизировать данные о влиянии лактоферрина на организм животного и человека и его возможности применения в животноводстве.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Лактоферрин обладает набором возможностей, которые могут быть применимы в животноводстве (рис. 1) [7].

Рис. 1. Основные функции лактоферрина

Fug. 1. The main functions of lactoferrin



¹ URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-lactoferrin-market>

² URL: <https://www.elsevier.com/products/scopus>

³ URL: <https://sci-hub.ru/>

⁴ URL: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov

⁵ URL: <https://elibrary.ru/>

⁶ URL: <https://scholar.google.com/>

⁷ URL: <https://www.sciencedirect.com/>

Доказаны антибактериальные, противовирусные и противогрибковые свойства лактоферрина [6, 7, 34–39].

Механизм противомикробного действия лактоферрина против разнообразных микроорганизмов обусловлен его способностью связывать или хелатировать железо, а также его молекулярным или клеточным взаимодействием как с инфекционными патогенами, так и с организмом хозяина [5, 6, 40, 41].

Противовирусное действие

Одним из этапов противовирусного действия лактоферрина является ингибирование вирусной репликации после проникновения вируса в клетку. Данное не прямое воздействие реализуется через регуляцию активности гранулоцитов и макрофагов — клеток, играющих ключевую роль на ранних стадиях развития вирусной инфекции [42].

Наиболее изученным механизмом противовирусной активности лактоферрина является предотвращение адгезии вирусных частиц к поверхности клеток-мишеней. Это достигается за счет связывания белка с липопротеинами клеточных мембран, что препятствует взаимодействию вирусных частиц с клеточными рецепторами. Кроме того, лактоферрин способен напрямую осуществлять связь с вирусными частицами, блокируя их проникновение в клетки [42–44].

Одним из этапов противовирусного действия лактоферрина является ингибирование вирусной репликации после проникновения вируса в клетку. Данное не прямое воздействие реализуется через регуляцию активности гранулоцитов и макрофагов — клеток, играющих ключевую роль на ранних стадиях развития вирусной инфекции [42].

Лактоферрин способен ингибировать проникновение ряда вирусов в клетки хозяина, включая вирус простого герпеса, ротавирус, вирус папилломы человека и ВИЧ [6, 45]. Будучи многофункциональным белком, лактоферрин демонстрирует выраженную противовирусную активность в отношении широкого спектра патогенов, включая цитомегаловирус, вирусы гепатитов *B* и *C*, вирус простого герпеса крупного рогатого скота, а также ротавирусы [46].

Лактоферрин проявляет противовирусное действие в отношении как РНК-содержащих, так и ДНК-содержащих вирусов, включая патогены, опасные для сельскохозяйственных животных. Будучи многостадийным процессом, противовирусное действие лактоферрина реализуется на различных этапах инфекционного цикла. На начальной стадии инфекции он снижает эффективность проникновения вируса в клетку-хозяина (как в случае с ротавирусами и вирусом гепатита *B*), тогда как на более поздних стадиях он подавляет внутриклеточную репликацию вируса в уже инфицированных клетках (что наблюдается при инфекциях, вызванных вирусами гепатитов *C* и *G*, а также ВИЧ) [5, 37].

Диарея телят является наиболее частой причиной смертности и антимикробной терапии телят до отъема на многих хозяйствах.

Будучи исследованным в качестве потенциального противовирусного средства против вируса диареи крупного рогатого скота (семейство *Flaviviridae*), бычий лактоферрин (далее — БЛФ) продемонстрировал выраженную противовирусную активность как на начальных стадиях инфекционного процесса, так и в фазу активного развития заболевания. Кроме того, при комбинированном применении БЛФ с другими биологически активными соединениями, в частности с низином, был зафиксирован значительный синергетический эффект [46].

Будучи изученным в контексте борьбы с диареей у крупного рогатого скота, лактоферрин продемонстрировал способность оказывать противовирусное действие как на начальных этапах заболевания, так и в период его активной клинической манифестации [1, 47]. Положительная динамика наблюдалась в изменении микрофлоры кишечника: количество *Enterococcus faecalis* с гемолитической активностью снизилось у опытной группы после лечения при одновременном увеличении количества представителей нормофлоры: *Lactobacillus spp.*, *Bifidobacterium spp.* [47].

Исследования [48] показали, что ни чеснок, ни лактоферрин не оказали существенного влияния на продолжительность заболевания или средний прирост веса телят в течение 10-дневного периода. Однако лактоферрин снижал смертность и выбраковку при введении телятам до отъема.

Исследование [49] подтверждает практическую применимость лактоферрина как дополнительной терапии для борьбы с проблемой диареи у телят. Хотя относительный риск гибели или выбраковки между контрольной и опытной группами лечения не имел существенных различий, ситуация может измениться при оптимизации доз и режимов введения.

Антибактериальное действие

Антибактериальная роль лактоферрина — ключевой элемент врожденного иммунного ответа животных и человека [50].

Бактерицидный эффект лактоферрина обусловлен наличием специфических лактоферриновых рецепторов на клеточной поверхности микроорганизмов. Белок взаимодействует с липополисахаридами клеточной стенки микроорганизмов, а входящая в его состав окисленная форма железа способствует активации процессов перекисного окисления. Установлено, что лактоферрин способен разрушать бактериальную мембрану и проникать внутрь клетки [42, 51–53].

Особенностью лактоферрина является протеолитическая активность. Она может нарушать функцию факторов вирулентности бактерий, снижая способность бактерий адгезировать или проникать в клетки хозяина, что, возможно, приводит

к снижению патогенности некоторых бактериальных организмов [54–57].

Будучи подтвержденной в условиях как *in vitro*, так и *in vivo*, антибактериальная активность лактоферрина проявляется в отношении широкого спектра микроорганизмов, включая грамположительные (*Bacillus subtilis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Actinobacillus* и др) и грамотрицательные (*Escherichia coli*, энтеропатогенные штаммы *Helicobacter pylori*, *Legionella pneumophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Shigella flexneri*, *Vibrio cholerae*, *Mycobacterium tuberculosis*, *Salmonella enteritidis* и др) бактерии [58, 59].

Антибактериальная активность лактоферрина была продемонстрирована в отношении ряда бактерий, таких как *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Haemophilus influenzae*, *Vibrio cholerae*, *Chlamydia psittaci* и *Listeria monocytogenes* [60–62].

Доказано, что лактоферрин проявляет антибактериальный потенциал против множества бактерий, таких как *Yersinia pestis*, *Proteus spp.*, *Streptococcus canis*, *Streptococcus pyogenes*, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus zooepidemicus*, *Klebsiella pneumoniae* и *Candida albicans* [63, 64]. Лактоферрин может препятствовать адгезии различных патогенов, таких как *Actinobacillus pleuropneumoniae*, и нескольких патотипов *Escherichia coli* (энтероагрегатных, энтеропатогенных и энтеротоксигенных) к клеткам хозяина [54, 65].

Исследователи установили, что лактоферрин снижает резистентность к ванкомицину у ванкомицин-резистентных (vanB) энтерококков и усиливает активность многих антибиотиков против сальмонелл [66, 67].

Лактоферрин может снизить образование биопленки у различных патогенов, таких как *Streptococcus mutans*, *A. pleuropneumoniae*, *Porphyromonas gingivalis*, *P. aeruginosa* и *V. parahaemolyticus*, что затрудняет персистенцию бактерий, и, следовательно, лактоферрин способствует ослаблению вирулентности этих патогенов [65, 68–70].

Будучи исследованным в качестве добавки к семенному разбавителю, рекомбинантный лактоферрин человека (далее — рчЛФ) продемонстрировал положительное влияние на качественные показатели и микробиологическую чистоту спермы хряков. Установлено, что более высокие значения подвижности сперматозоидов после 24, 48 и 72 часов хранения наблюдались в образцах с добавлением рчЛФ в концентрациях 10 и 15 мг/л разбавителя. Отмечается, что в эякулятах с указанными концентрациями рчЛФ были зафиксированы наиболее стабильные физико-химические показатели — уровень pH и осмотическое давление, а также отсутствовала контаминация условно-патогенными и патогенными микроорганизмами [71].

Лактоферрин человека (далее — чЛФ) осуществляет защитные функции у мышей, нокаутных по гену лактоферрина от экспериментальной бактериемии, вызванной *Streptococcus mutans* [72].

Рекомбинантный мышинный лактоферрин был испытан против метициллин-резистентного золотистого стафилококка (MRSA) в модели перитонита у мышей. Результаты показали, что рекомбинантный мышинный лактоферрин улучшал иммунный ответ, снижая бактериальную нагрузку и концентрацию цитокинов, таких как IL-17 и IL-6, у мышей после заражения [73].

Мастит крупного рогатого скота — давняя проблема в животноводстве. Лечение антибиотиками является основным терапевтическим подходом к маститу, однако высокий уровень риска, связанный загрязнением молока антибиотиками, создает множество проблем, и крайне необходимы новые методы лечения и профилактики. Использование лактоферрина против мастита в настоящее время имеет потенциал как для предупреждения болезни, так и для ее лечения, поскольку он является естественным противомикробным молочным белком. Лактоферрин может способствовать улучшению качества борьбы с маститом у сельскохозяйственных животных [74, 75]. Трансгенные коровы, инфицированные *Staphylococcus chromogenes*, в отличие от контрольных коров, не имели признаков клинического мастита [76]. Исследования показывают, что добавление лактоферрина к антибиотикотерапии при мастите может улучшить бактериологический клиренс и снизить время клинического выздоровления [77].

Сообщалось о способности бЛФ устранять бактериальную инфекцию, вызванную кишечной палочкой (*Escherichia coli*), у крупного рогатого скота [78].

Используя систему экспрессии на основе полиэтилентерефталата, химерный пептид из верблюжьего лактоферрина был создан в периплазматическом пространстве *Escherichia coli* и продемонстрировал антибактериальное действие как на грамотрицательные, так и на грамположительные патогенные бактерии птиц (*Staphylococcus epidermidis*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*), а также на патогенные для птиц *Escherichia coli* и *Salmonella enteritidis*, обладая при этом низкой гемолизующей активностью в крови кур и высокой стабильностью в сыворотке [79].

Таким образом, рекомендуется, чтобы использование лактоферрина, как отдельно, так и в сочетании с антибиотиками, являлось ключевой тактикой лечения бактериальных инфекций, особенно вызванных резистентными штаммами [6].

Противопаразитарное действие

Лактоферрин демонстрирует выраженное противопаразитарное действие в отношении *Pneumocystis carinii*, *Entamoeba histolytica*, *Babesia*

caballi и *Babesia equi*, что связано с его способностью к связыванию и удержанию ионов железа. Однако при железодефицитных состояниях некоторые простейшие, включая *Trichomonas vaginalis* и *Tritrichomonas foetus*, напротив, приобретают способность использовать лактоферрин в качестве источника этого микроэлемента [80].

Лактоферрин проявляет противопаразитарную активность против ряда паразитов, включая *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia* и *Cryptosporidium parvum* [69, 81]. Хотя точный механизм действия не всегда ясен, лактоферрин часто препятствует усвоению железа паразитом. Однако в некоторых случаях, например с *Plasmodium falciparum*, лактоферрин может препятствовать адгезии, возможно, снижая его вирулентность [82].

Лечение цыплят диклазурилом и (или) лактоферрином продемонстрировало мощный антиоксидантный и антикокцидийный эффект, что привело к снижению выделения ооцист, степени поражения и лимфоцитарных инфильтратов в слепой кишке. Кроме того, эти методы лечения улучшили антиоксидантную и иммунную системы у цыплят и восстановили все гистопатологические изменения, отмеченные в инфицированной группе, не получавшей лечение [83].

При экспериментальном пероральном введении нанокапсулированного лактоферрина буйвола мышам, инфицированным малярийным плазмодием *Plasmodium berghei*, было зафиксировано выраженное ингибирующее действие на развитие паразита при одновременном сохранении нормального метаболизма железа в организме хозяина [38].

Противогрибковое действие

Будучи экспериментально подтвержденной, противогрибковая активность лактоферрина проявляется в отношении дрожжеподобных грибов рода *Candida* и плесневых грибов рода *Aspergillus*. Кроме того, исследования демонстрируют, что при комбинированном применении лактоферрина с основными противогрибковыми препаратами (флуконазолом, кетоконазолом, амфотерицином, клотримазолом и др) наблюдается выраженный синергетический эффект [84, 85].

Исследования показали, что лактоферрин проявляет фунгистатическое действие на *Candida albicans* и *Rhodotorula rubra*. Лактоферрин подавляет рост *Blastomyces dermatitidis*, грибов рода *Trichophyton* и внутриклеточное развитие паразита *Toxoplasma gondii*, а также рост более чем 50% цист и трофических форм *Pneumocystis carinii* [66].

Группа исследователей оценили противогрибковую активность БЛФ против 24 плесневых грибов и 22 дрожжей, а также эффективность его в сочетании с 6 распространенными противогрибковыми препаратами. Экспериментальные исследования показали, что БЛФ проявляет выраженную противогрибковую активность: он

эффективно ингибировал рост всех протестированных дрожжевых культур, однако оказывал ингибирующее действие лишь на 4 вида плесневых грибов. При этом степень подавления активности дрожжей зависела от уровня насыщения лактоферрина ионами железа [86].

Авторами исследований предлагается применение лактоферрина в комбинации с противогрибковыми препаратами для лечения инфекций, вызванных резистентными штаммами, что представляет особую клиническую значимость для организмов с ослабленной иммунной системой [86–88].

Другие возможности

Лактоферрин увеличивает количество остеобластов, ответственных за костеобразование и поддержание минеральной плотности костной ткани, посредством стимуляции пролиферации и дифференцировки этих клеток. В ряде случаев лактоферрин как стимулятор остеогенеза демонстрирует более выраженную эффективность по сравнению с кальцием и витамином D, усиливая способность остеобластов к синтезу и минерализации костного матрикса [89].

Позитивное влияние на процессы костеобразования было подтверждено в исследованиях на поросятах, получавших молоко с добавлением рЧЛФ [90]. РЧЛФ оказывает ингибирующее влияние на образование остеокластов, предупреждает деструкцию костной ткани у овариоэктомизированных животных. Клинические исследования продемонстрировали увеличение срока заживления костных травм при снижении уровня эндогенного лактоферрина [89].

H.Y. Guo *et al.* [91] сообщили, что пищевой лактоферрин улучшает костную массу, прочность и минеральную плотность костей, что приводит к восстановлению микроархитектуры костной ткани у крыс после овариэктомии. Например, хрупкость костей является серьезной проблемой для кур-несушек, содержащихся в клетках. Таким образом, лактоферрин, один из анаболических компонентов костей, успешно увеличивал прочность и массу большеберцовых костей, а также массу яиц у кур-несушек путем инъекций лактоферрина в яйца в дозе 67,5 г на яйцо [92].

В исследовании В.Д. Humphrey и соавт. [93] цыплятам давали рис, генетически модифицированный для экспрессии человеческого лизоцима и лактоферрина, с общим содержанием трансгенного и обычного риса 20% в рационе на основе кукурузы и сои для оценки влияния на показатели роста и здоровье кишечника. Цыплята, получавшие рацион с 5% лактоферрина + 10% лизоцима + 5% обычного риса, превзошли цыплят, получавших рацион с 20% обычного риса, по толщине собственной пластинки двенадцатиперстной кишки и эффективности кормления.

Были проведены исследования по получению и определению железосвязывающей способности

лактоферрина, выделенного из сборного молока голштино-фризской (черно-пестрой) породы коров. Исследования продемонстрировали перспективность применения железонасыщенного варианта хололактоферрина, выделенного из коровьего молока голштино-фризской породы, в качестве сырья при производстве биологически активных добавок и продуктов питания специального назначения [44].

Крупный рогатый скот, благодаря способности к интенсивному белковому синтезу, значительной продуктивности и относительно невысоким затратам на корм и содержание, является оптимальным вариантом для промышленного продуцирования гетерогенных белков в сравнении с затратами на «ферментацию» *in vitro* [94, 95].

Лактоферрин обладает выраженной противовоспалительной активностью, в том числе в отношении интерлейкина-6 (IL-6). Его противовоспалительное действие связано, в частности, со способностью связывать ионы железа: белок снижает внутриклеточное содержание свободного железа, избыток которого может повышать восприимчивость организма к инфекционным агентам [1].

Лактоферрин участвует в иммуномодулировании [96, 97]. Может развивать условное взаимодействие между дендритными клетками и нейтрофилами, активируя врожденные и адаптивные иммунные реакции [6, 98].

I. Dhennin-Duthille и соавт. [99] сообщили, что ЧЛФ и БЛФ способны связываться с поверхностными рецепторами Т-лимфоцитов (клеточная линия Jurkat). Молекулярная экспрессия рецепторов лактоферрина была обнаружена и во всех подтипах Т-лимфоцитов [18].

Применение в животноводстве

Будучи многофункциональным белком, участвующим в многочисленных иммунологических процессах, механизмах развития нервной системы и метаболизме, лактоферрин рассматривается как перспективная биологически активная добавка и нутрицевтик в рационах животных [6, 100]. В частности, применение лактоферрина является научно обоснованным в питании молодняка сельскохозяйственных животных и птицы. Наряду с медицинским использованием его эффективность подтверждена при включении в состав заменителей цельного молока, широко применяемых для выпойки молодняка сельскохозяйственных животных [1, 30].

Телята

Экспериментальные данные показывают, что включение в рацион телят (в возрасте 1–30 дней) замороженно-оттаянного козьего молока, содержащего лактоферрин, положительно влияет на физиологическое состояние животных. У таких телят отмечено увеличение содержания тромбоцитов (на 3,9%) и мочевины (на 6,0%). Наибольший

зоотехнический эффект наблюдался при дозировках 0,44 л и 0,66 л гол/сут: среднесуточный прирост живой массы повышался на 14,4% и 17,3% соответственно, при этом затраты кормов снижались на 8,6–9,5% [51, 101]. Кроме того, использование рекомбинантных белков в рационе способствует улучшению состояния здоровья животных, ускоряет восстановление слизистой кишечника и формированию благоприятной микробиоты желудочно-кишечного тракта [42].

Проводились исследования по оценке эффекта добавления лактоферрина (0, 1 и 10 г/д) к молозиву, молоку и заменителю молока в 56-дневном исследовании при кормлении телят голштинской породы. Телята, получавшие лактоферрин, весили больше в течение 2–6-й недель, чем контрольные телята. Телята, получавшие лактоферрин, имели более высокие суточные приросты веса до отъема по сравнению с телятами, которым не давали лактоферрин. Телята, получавшие 1 г/д лактоферрина, имели более высокий средний суточный прирост до отъема, чем телята, получавшие 10 г/д лактоферрина [102].

В другом исследовании оценивались микродоросль *Schizochytrium sp.* и лактоферрин в качестве подхода к питательной интервенции против диареи телят до отъема, вызванной *E. coli* O101:K99. Результаты показали, что добавки лактоферрина и *Schizochytrium sp.* могут облегчить диарею у телят, вызванную *E. coli* O101:K99, как по отдельности, так и в сочетании. Добавление в сутки 1 г лактоферрина и 20 г *Schizochytrium sp.* может быть потенциальным методом коррекции питания для профилактики бактериальной диареи у телят [103].

В исследовании [104] изучалось влияние добавления в рацион телят фризской породы лактоферрина (0, 1 и 2 г/день/гол). У телят, получавших лактоферрин, наблюдалось выраженное повышение общего белка в сыворотке крови, уровня глобулина, глюкозы, концентрации IgG и IgA, при этом наблюдалось значительное снижение общих липидов в сыворотке крови, холестерина, а также АЛТ, АСТ, креатинина и азота мочевины крови. Прирост живой массы у телят, получавших лактоферрин, был выше.

В данном исследовании можно сделать вывод, что лактоферрин может быть полезной добавкой в рацион новорожденных телят перед отъемом.

Изучалось влияние перорально вводимого лактоферрина на выбранные параметры иммунной системы у телят. Пяти телятам скармливали лактоферрин (начиная с 3-го дня жизни) с молозивом, а с 6-го дня жизни — заменитель молока, обогащенный 0,16%-ным лактоферрином. Среднесуточное потребление лактоферрина на теленка составляло 1,5–1,6 г/день. Было показано, что лактоферрин, вводимый перорально, действует как иммуномодулирующее средство, увеличивая размер агрегированных лимфоидных узлов в подвздошной кишке и повышая уровень IgG

в сыворотке крови. Кроме того, увеличилось количество лейкоцитов периферической крови и повысились уровни мРНК различных интерлейкинов (IL), таких как IL-1 β , IL-8, IL-10, и интерферон гамма (IFN γ) в этих клетках в ответ на действие лактоферрина. В крови экспрессия мРНК генов провоспалительных маркеров IL-1 β и IFN γ снизилась в течение 10 недель лечения. Кроме того, кормление лактоферрином уменьшило размеры ворсинок в тощей кишке телят. В совокупности эти результаты подчеркивают способность лактоферрина стимулировать важные параметры иммунной системы и то, что он обладает способностью модулировать иммунные реакции [105].

Цель исследования [106] — оценка влияния добавления лактоферрина к заменителю молока с различным содержанием сырого протеина на потребление сухого вещества, рост и продолжительность лечения телят голштинской породы.

Установлено, что усиленное кормление заменителем молока способствует более быстрому росту в период до отъема по сравнению с телятами, получавшими традиционное кормление, но дополнительное введение бычьего лактоферрина не оказывало положительного влияния в данных экспериментальных условиях.

Ягнята

Данное исследование [107] было направлено на изучение влияния различных уровней пробиотиков и БЛФ на состояние здоровья и уровень инфицирования *E. coli* у молочных ягнят породы тексель. Экспериментальное лечение включало два уровня пробиотиков (0 и 1 г/день/гол) и три уровня БЛФ (0, 0,25 и 0,50 г/день/гол), которые использовались индивидуально в течение 56 дней эксперимента. Результаты показали, что, несмотря на отсутствие значительной разницы между фекальной оценкой и температурой тела между экспериментальными группами, одновременное применение пробиотиков и БЛФ сократило количество дней приема лекарств в экспериментальных группах по сравнению с контрольной группой. Кроме того, взаимодействие пробиотика разных концентраций и БЛФ снижало экскрецию *E. coli* с фекалиями. БЛФ приводил к линейному увеличению концентрации железа в плазме по сравнению с контрольной группой, при этом наибольший уровень БЛФ сопровождался наибольшим увеличением концентрации железа. Согласно результатам настоящего эксперимента, БЛФ в сочетании с пробиотиком, по-видимому, может оказывать синергетический эффект на продуктивность и здоровье ягнят в период до отъема.

Исследование M. El-Ashker *et al.* [108] показало, что сочетание добавки лактоферрина и лактобактерий вызвало максимальную регуляцию экспрессии генов Tollip, TLR4, IL-5 и IL-6 у ягнят. Результаты показывают, что БЛФ можно использовать в качестве полезных пищевых добавок для поддержки иммунной системы у здоровых ягнят.

Козы

Цель данного исследования [109] — изучение биологических эффектов добавления БЛФ в дозе 100 мг/кг/день (1-я группа) и 200 мг/кг/день (2-я группа) дойным молочным козам. Добавление в рацион БЛФ увеличило концентрацию лактоферрина в молоке и сыворотке ($p \leq 0,05$), не влияя на потребление корма. В 1-й группе сывороточное железо, общий антиоксидант (Т-АОС) и иммуноглобулин А (IgA) были увеличены ($p \leq 0,05$), в то время как малоновый диальдегид (MDA) был снижен ($p \leq 0,05$). Во 2-й группе значение pH рубцовой жидкости было снижено ($p \leq 0,05$), а состав микрофлоры рубца на 42-й день был более разнообразным. В обеих группах наблюдали более низкое количество соматических клеток молока и более высокий уровень IgA по сравнению с контрольной группой ($p \leq 0,05$). Эти результаты свидетельствуют о положительном влиянии добавки БЛФ в дозе 100 мг/кг/день на снижение окислительного стресса и изменение разнообразия микрофлоры рубца.

В данном исследовании [110] изучалось влияние лактоферрина и N-ацетилцистеина (NAC) на скорость роста и иммунный ответ египетских коз породы балади. Результаты показали значительные улучшения в концентрации гемоглобина, общем количестве лейкоцитов и различных типах лейкоцитов в группах, получавших лактоферрин и NAC, по сравнению с контрольной группой. Примечательно, что группа, получавшая лактоферрин в концентрации 200 мг/мл, продемонстрировала наиболее значительные улучшения с контрольной и другими группами.

Лактоферрин в дозе 50 мг/мл/день привел к более высоким уровням общего белка, альбумина и креатинина, чем как в контрольной, так и в других группах лечения с аналогичной дозой NAC 50 мг/мл/день. Можно сделать вывод, что введение лактоферрина заметно улучшает темпы роста и показатели крови коз данной породы.

Лактоферрин оказывает благотворное влияние на состав микробиоты и морфологическое состояние кишечника, способствуя восстановлению слизистой оболочки и смягчению повреждений, вызванных воздействием патогенной микрофлоры. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования лактоферрина в качестве кормовой добавки, направленной на поддержание здоровья кишечника и формирование полезной микробиоты желудочно-кишечного тракта. Стоит отметить, что привыкание к данному белку не развивается [111–113].

Поросята

Применение лактоферрина в рационе поросят-отъемышей как биологически активной добавки способствует улучшению показателей роста, снижению частоты диареи, а также положительно влияет на микрофлору и морфологию кишечника. Такие эффекты делают лактоферрин

эффективным средством профилактики инфекций и снижения стрессовых воздействий в период отъема [114].

Исследование [115] было сосредоточено на влиянии добавки БЛФ на здоровье кишечника поросят-отъемышей (дюрок × ландрас × йоркшир). Результат показал, что пищевая добавка БЛФ может улучшить показатели роста и уменьшить диарею. Кроме того, добавление БЛФ увеличило численность *Lactobacillus* и *Bifidobacterium* и снизило численность *E. coli* в слепой кишке на 7-й день ($p \leq 0,05$). БЛФ может быть перспективной кормовой добавкой для снятия стресса у поросят при отъеме.

Исследование показало [116], что добавление лактоферрина свиноматке значительно увеличивало продуктивность молока в различные временные точки (1-й, 3-й, 7-й и 19-й день) лактации по сравнению с контролем ($p \leq 0,001$). Значительно увеличился прирост живой массы поросят в течение первых 19 дней жизни по сравнению с контрольной группой ($p \leq 0,05$). Наблюдалась тенденция к повышению частоты наступления беременности, размера помета и веса при рождении, количества живорожденных поросят, а также к снижению количества погибших поросят и поросят с задержкой внутриутробного развития (ЗВУР). Значительно увеличилась концентрация сывороточного IgA у свиноматок и сывороточного sIgA у поросят ($p \leq 0,05$). Можно сделать вывод, что введение лактоферрина в свиноматку улучшит продуктивность свиней и уровень сывороточных IgA и sIgA и, следовательно, играет ключевую роль в формировании продуктивности их потомства.

Проводились исследования по влиянию лактоферрина на показатели роста и иммунитет свиней-отъемышей (дюрок × ландрас × йоркшир). Рацион питания включал контрольную группу (базовый рацион), группу антибиотиков (базовый рацион + 20 мг/кг флавомицина + 110 мг/кг ауреомицина) и группу лактоферрина (базовый рацион + 1,0 г/кг лактоферрина).

Результаты показали, что добавление лактоферрина улучшило пролиферацию периферических лимфоцитов, стимулированную фитогеммагглютинином (ФГА), на 36% ($p \leq 0,01$), увеличило пролиферацию лимфоцитов селезенки, индуцированную конканавалином А (КонаА) и ФГА, на 332% ($p \leq 0,01$) и 258% ($p \leq 0,01$), повысило уровень IgG в сыворотке на 20% ($p \leq 0,05$), IgA на 13% ($p \leq 0,05$), IgM на 15% ($p \leq 0,05$), С4 на 29% ($p \leq 0,05$), IL-2 на 12% ($p \leq 0,01$) и показатели сывороточного железа на 22% ($p \leq 0,05$) на 15-й день по сравнению с контролем. Добавление лактоферрина увеличило пролиферацию лимфоцитов, стимулированную ФГА ($p \leq 0,01$), сывороточного IgG на 16% ($p \leq 0,05$), IgA на 17% ($p \leq 0,05$), С4 на 11% ($p \leq 0,05$), IL-2 на 14% ($p \leq 0,05$) и показатели сывороточного железа на 23% ($p \leq 0,01$), а также снизило коэффициент диареи ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем на 30-й день.

По сравнению с контрольной группой добавление антибиотика увеличило пролиферацию лимфоцитов селезенки, вызванную ConA и ФГА ($p \leq 0,05$) на 15-й день, снизило коэффициент диареи ($p \leq 0,05$) и увеличило пролиферацию лимфоцитов селезенки, вызванную ФГА ($p \leq 0,05$), и показатели сывороточного железа ($p \leq 0,01$) на 30-й день. Эти результаты подтверждают возможное использование лактоферрина в качестве иммуностимулятора для улучшения иммунных функций и укрепления защитных сил организма, и это, по-видимому, является хорошим методом защиты поросят-отъемышей от инфекций и стресса при отъеме [117].

Исследования [118] проводили на поросятах-отъемышах, которые получали следующие добавки в рацион: 100 мг/кг лактоферрина (1-я группа); пробиотик *Pediococcus acidilactici* FT28 (1×10^9 КОЕ) (2-я группа); пробиотик *Pediococcus acidilactici* FT28 (1×10^9 КОЕ) и 100 мг/кг лактоферрина (3-я группа). Средний суточный прирост и живая масса при отъеме были значительно улучшены во 2-й группе пробиотика. Выживаемость поросят была значительно выше в группах коровьего лактоферрина и пробиотика. Концентрации IgA на 21-й день значительно увеличилась во всех исследуемых группах ($p \leq 0,05$). Концентрации IgG на 7-й и 15-й день в 1-й и 3-й группах были значительно ($p \leq 0,05$) повышены, в то время как концентрация трансформирующего фактора роста-β1 значительно ($p \leq 0,05$) увеличилась с 7-го по 21-й день во всех исследуемых группах по сравнению с контрольной. Можно отметить, что применение на раннем этапе жизни лактоферрина и пробиотика *Pediococcus acidilactici* FT28 снизило смертность у поросят за счет повышения системного иммунитета и улучшения целостности кишечника.

Пероральное введение БЛФ не оказало заметного влияния на α- и β-разнообразие кишечного микробиома у поросят-отъемышей. Тем не менее оно увеличило РА актинобактерий типа *Actinobacteria* и бифидобактерий, которые играют важную роль в поддержании гомеостаза кишечника. Более того, введение БЛФ во время инфекции *E. coli* привело к отсутствию специфичных для F18 сывороточных IgG-ответов [119].

В ряде исследований показана положительная роль рекомбинантного лактоферрина человека, полученного из молока трансгенных коров, в регуляции кишечной микрофлоры и укреплении иммунитета поросят [115, 117, 120, 121]. Так, в исследованиях С.А. Соопер *et al.* выпаивание поросят молоком, содержащим рЧЛФ, полученным от трансгенных коров, улучшало состояние желудочно-кишечного тракта и общее физиологическое состояние животных [122].

Сельскохозяйственная птица

Данные С.-С. Yen *et al.* [39] показали, что лактоферрин — это кормовая добавка, улучшающая иммунитет птиц, включая образование антител

и клеточный иммунитет. Н. Badr *et al.* [123] измерили концентрации лизоцима и NO в крови цыплят-бройлеров, экспериментально зараженных *E. coli* и получавших лактоферрин в рационе. Концентрации лизоцима были численно увеличены, но NO имел значительно более высокие уровни по сравнению с группой без добавления лактоферрина, что указывает на провоцирование неспецифического иммунного ответа.

Лактоферрин был идентифицирован как эффективная пребиотическая кормовая добавка в дозировке 100 мг/кг, применение которой способствует профилактике и лечению цыплят, экспериментально зараженных лекарственно-устойчивыми штаммами *E. coli* [123]. В этом исследовании лактоферрин улучшил продуктивность цыплят, предотвратил гибель и клинические признаки, а также позитивно повлиял на устранение бактерий из печени.

Добавление лактоферрина в рацион птицы значительно способствовало поддержанию здоровья и повышению темпов роста. Кормление лактоферрином (в дозировках от 100 до 500 мг/кг) значительно повышает усвояемость корма, укрепляет иммунитет, снижает окислительный стресс и в конечном итоге улучшает продуктивные показатели [124].

K.J. Barrington *et al.* оценили влияние лактоферрина в корме на продуктивность птиц, микробиоту кишечника, иммунную систему слизистой оболочки и микроархитектуру кишечника оценивали на самцах бройлеров породы Cobb 500. Птицы опытных групп получали одну из добавок: 50 мг/кг бацитрацина цинка, 250 мг/кг лактоферрина и 500 мг/кг лактоферрина. Выявлено, что по сравнению с контрольными птицами, получавшими лактоферрин, показали некоторые различия в пропорциях Т-клеток в миндалинах слепой кишки и селезенке [125].

У кур, иммунизированных против вируса инфекционной бурсальной болезни (ИББ), добавление в рацион рекомбинантного свиного лактоферрина значительно повышало экспрессию IL-12 и IFN γ , а также увеличивало титры антител, специфичных к ИББ, и уровень сывороточного IgG [126]. Кроме того, предполагалось, что рекомбинантный свиной лактоферрин гармонично взаимодействует с IFN γ и IL-12, усиливая иммунную функцию. Было обнаружено, что после воздействия антигена рекомбинантный свиной лактоферрин запускает выработку достаточного количества IL-12 и IFN γ , что может способствовать формированию линии Th1 в субпопуляциях лимфоцитов [126].

Афлатоксин B1 (AFB1) — микотоксин, содержащийся в кормах для кур, представляющий глобальную опасность для здоровья домашней птицы. Однако различные сильнодействующие соединения, такие как БЛФ, могут оказывать защитное действие против AFB1. Авторы указывают, что токсичность AFB1 у птиц проявлялась в низком потреблении корма, снижении набора веса

и снижении FCR, в то время как БЛФ регулировал эти неблагоприятные эффекты [127].

Домашние питомцы

Щенки, потреблявшие рекомбинантное свиное молоко, обогащенное лактоферрином, имели значительно более высокий процент выживаемости и сниженное содержание вирусной геномной РНК после заражения энтеровирусом (EV71) через 4 дня после рождения, что свидетельствует о блокирующем влиянии свиного лактоферрина на вирусную инфекцию EV71 [128].

Результаты исследования [129] указывают на потенциал лактоферрина и *Lactiplantibacillus plantarum* в качестве эффективных диетических добавок для улучшения здоровья котят, тем самым снижая зависимость от антибиотиков и связанные с ними риски.

Возможности трансгенеза

Козы являются одним из потенциальных животных для трансгенной модификации. Так, козы, использующиеся в качестве экспрессионной системы для получения рЧЛФ, были модифицированы с помощью дефектного по репликации аденовирусного вектора [130] или микроинъекцией в пронуклеус кДНК, кодирующей ЧЛФ [131]. Аденовирусный вектор содержал ген зеленого флуоресцентного белка и ген ЧЛФ, соединенные последовательностью внутреннего сайта посадки рибосомы, что обеспечивало высокий уровень коэкспрессии обоих белков [130]. Концентрация рЧЛФ в молоке варьировала от 0,5 до 2,6 мг/мл, достигая максимума на 6-й день лактации, однако после 25-го дня содержание белка становилось незначительным.

Исследователи установили прямую корреляцию между дозой аденовирусных векторов и количеством продуцируемого рЧЛФ. Вследствие недостаточной продуктивности данной системы был разработан оптимизированный вектор, содержащий ген ЧЛФ под контролем промотора гена козьего β -казеина, который вводили в фибробласты козы. Это позволило достичь среднего уровня экспрессии 30 мг/мл с максимальным значением 36 мг/мл [132]. На протяжении всего эксперимента физиологические и биохимические показатели здоровья животных оставались в пределах нормы. При этом повышенная экспрессия рЧЛФ у трансгенных коз сопровождалась подавлением синтеза эндогенных белков — α -S1- и β -казеинов, а также β -глобулина [132].

Биохимический анализ показал, что полученный рекомбинантный белок имел идентичную нативной форме N-концевую последовательность, а также близкие значения изоэлектрической точки и молекулярной массы. Противовоспалительная активность рЧЛФ была подтверждена в экспериментах на мышинной модели [132]. Важно отметить, что при использовании аналогичных технологий получения рекомбинантного белка содержание

коз является экономически более выгодным по сравнению с крупным рогатым скотом благодаря меньшим затратам на их содержание и уход.

Был осуществлен трансгенез ДНК-конструкций rhLf5 и rhLf3 с последующей отчисткой лактоферрина из молока в 98%. При системном употреблении крысами рчЛФ оказывал благоприятное действие на кишечную микрофлору, ультраструктуру печени и кишечника, активировал липидный метаболизм и стероидогенез [11, 133].

В 2020 году в Республике Беларусь были оценены экстерьерно-конституциональные качества стада трансгенных коз. Выявлена относительная выравненность производящего состава по экстерьеру и живой массе. Животные обладали гармоничным телосложением, существенные пороки и недостатки экстерьера отсутствовали. Средняя живая масса козлов-производителей составила 87,5 кг, высота в холке — 80,4 см, коз — 55,8 кг и 68,2 см соответственно [134].

Сперма первичных трансгенных коз-производителей обладает высокой оплодотворяющей способностью (71,6%) [135].

Установлено, что подвергнутый криоконсервации эмбриоматериал коз-продуцентов биоаналога лактоферрина человека продемонстрировал высокий уровень жизнеспособности после размораживания. В среднем около 90,9% эмбрионов остались жизнеспособными и подходящими для дальнейшего развития и переноса реципиентам. Применение 1,5 мл раствора этиленгликоля в качестве криофилика позволило после разморозки получить в среднем по стадиям развития 93,5% пригодных к пересадке зародышей, из которых доля клеток отличного и хорошего качества составила 90,0% [133].

Очищенный рчЛФ, полученный из молока трансгенных коз, демонстрирует комплексное положительное воздействие на организм. Очищенный рчЛФ способствует восстановлению баланса кишечной микрофлоры при антибиотико-ассоциированных дисбактериозах, активирует метаболические процессы, что проявляется в снижении уровня глюкозы, холестерина и липопротеинов низкой плотности при одновременном увеличении концентрации тестостерона. Белок активирует иммунокомпетентные клетки и секреторную функцию желудочно-кишечного тракта, снижает выраженность дистрофических изменений и некроза тканей при язвообразовании в тонкой кишке, а также ингибирует развитие воспалительных процессов в кишечной стенке [11].

Биохимические исследования подтвердили эффективность применения рчЛФ для коррекции нарушений, вызванных экспериментальным доксициклин-индуцированным холестазом у крыс, включая снижение негативных изменений активности аминотрансфераз и интенсивности процессов перекисного окисления липидов. Продemonстрирована его способность нормализовать работу антиоксидантной системы в модели

аллоксанового сахарного диабета. Эти данные имеют перспективы для клинического применения при разработке технологий коррекции метаболических процессов в органах и тканях [11, 136].

Результаты исследований [137] свидетельствуют об иммуностропной активности неолактоферрина, причем обогащение его ионами железа усиливает провоспалительную активность препарата.

Изучение воздействия рчЛФ (неолактоферрина) на модель перевиваемой опухоли рака шейки матки мышей (РШ М-5) выявило его дозозависимое ингибирующее действие на скорость опухолевого роста. Наиболее эффективной оказалась доза 200 мг/кг массы тела животных. Повторная перевивка опухоли этим мышам сопровождалась снижением скорости роста новообразования и увеличением продолжительности их жизни [138].

Молоко трансгенных животных

Первый фактор, на который обращается внимание, когда речь идет о продуктах питания, — это безопасность. Безопасность рчЛФ, полученного из молока трансгенных коров, была подтверждена в ходе исследований на крысах [139]. Опубликованные научные данные свидетельствуют, что рчЛФ из молока трансгенных коров демонстрирует высокую степень сходства с нативным человеческим лактоферрином как по уровню концентрации (1,5–3,4 г/л), так и по основным биологическим свойствам [140]. Несмотря на то что базовый состав молока трансгенных и обычных коров практически идентичен, профиль гликозилирования рчЛФ в молоке трансгенных животных и нативного чЛФ в грудном молоке человека имеет определенные различия [11, 141].

Установлено, что применение интервального доения коз-продуцентов биоаналога человеческого лактоферрина вызывает статистически значимые изменения физико-химических и биохимических показателей молока. Параметры физико-химического состава молока при режиме доения один раз в два дня существенно превышали аналогичные показатели при ежедневном доении. Содержание жира было выше на 32%, белка — на 12%, сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО) — на 9%, плотности — на 18%, лактозы — на 2% (до 5,52%) ($p \leq 0,001$). Такой режим доения привел к резкому увеличению количества соматических клеток в молоке: средний показатель SCC достиг 1245,27 тыс/см³ ($p \leq 0,001$), что в 5,2 раза (или на 81%) превышало уровень начального периода (1–10-й день). При интервальном доении концентрация рчЛФ возрастала на 15,2–66,0% ($p \leq 0,001$) по сравнению с исходным периодом. Таким образом, интервальное доение коз-продуцентов рекомбинантного белка активизирует синтез человеческого лактоферрина, что открывает возможности для регуляции производства рчЛФ [142].

Исследование А.И. Будевича и соавт. было посвящено изучению влияния сезона года и стадии лактации на состав молока коз-продуцентов биоаналога человеческого лактоферрина. Значения физико-химических параметров молока (белка, лактозы, СОМО, плотности, температуры заморозания) у трансгенных животных второго и третьего года лактации оказались на 1–6% выше ($p \leq 0,05$) по сравнению с обычными животными, при этом отмечалось снижение массовой доли жира в молоке коз-продуцентов рЧЛФ на 5–8% ($p \leq 0,05$) [143].

В настоящее время лактоферрин добавляют в детские смеси из-за его потенциальной пользы для младенцев. В 2012 году EFSA⁸ пришло к выводу, что бычий лактоферрин безопасен в качестве нового пищевого ингредиента при добавлении в детские смеси на уровне 1000 мг/л. Вскоре это сделали и во многих других странах мира. EFSA подсчитало, что максимальная доза потребления бычьего лактоферрина для младенцев составит 1,1 г/день [144].

⁸ Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA) является научным органом, который оценивает безопасность пищевых продуктов и пищевых ингредиентов в Европейском союзе.

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.

Выводы/Conclusions

Исходя из анализа литературы, можно сделать вывод о позитивном влиянии лактоферрина на противомикробную, противогрибковую, противовирусную и иммуномодулирующую активность. Лактоферрин находит всё более широкое применение в сфере животноводства и ветеринарии, однако сложность получения и очистки тормозит этот процесс.

Перспективными являются разработка и внедрение биологически активных добавок с лактоферрином, направленных на иммунокоррекцию, и укрепление организма сельскохозяйственных животных. Лактоферрин может быть использован в качестве вещества для создания лечебного средства в ветеринарии.

Кроме того, обширные возможности могут быть получены для отрасли при создании стад трансгенных животных биоаналога лактоферрина человека. Необходимы новые исследования и оптимизация для дальнейшего внедрения использования лактоферрина для решения задач АПК России.

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 Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жилыкова Е.Т. и др. Свойства и перспектива применения белка молочной сыворотки лактоферрина в медицине и ветеринарии (обзор). *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2022; 11(1): 32–39. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2022-11-1-32-39>
2. Фисинин В. Нарастиваем производство мяса и яйца. *Животноводство России*. 2023; (1): 12–14. EDN BKNRDW
3. Гонова О.В., Малыгин А.А., Лукина В.А., Воробьева О.К. Модернизация молочно-мясного скотоводства в агроформированиях: инновационный подход. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021; (4): 86–92. EDN GQQZLO
4. Яркова Т.М. Состояние и проблемы развития молочного скотоводства в России. *Продовольственная политика и безопасность*. 2024; 11(1): 119–134. EDN OJJAQK
5. Садовская Т.Н. Лактоферрин, его свойства, получение и применение в зоотехнии и ветеринарии. *Фундаментальная и прикладная наука: актуальные вопросы теории и практики. Сборник статей IV Международной научно-практической конференции*. Пенза: Наука и просвещение. 2023; 66–70. EDN SQQLXX
6. Ashraf M.F. et al. Nutraceutical and Health-Promoting Potential of Lactoferrin, an Iron-Binding Protein in Human and Animal: Current Knowledge. *Biological Trace Element Research*. 2024; 202(1): 56–72. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03658-4>
7. Demir R., Saritaş S., Bechelany M., Karav S. Lactoferrin: Properties and Potential Uses in the Food Industry. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(4): 1404. <https://doi.org/10.3390/ijms26041404>
8. Гудок А.А., Дейкин А.В. Лактоферрин — перспективы использования в пищевой, фармацевтической и сельскохозяйственной промышленности. *Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства*. 2016; 9(1): 421–424. EDN WJGTH

REFERENCES

1. Zhilyakova E.T. et al. Properties and Prospects of Application of the Whey Protein Lactoferrin in Medicine and Veterinary Medicine (Review). *Drug development & registration*. 2022; 11(1): 32–39 (in Russian). <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2022-11-1-32-39>
2. Fisinin V. Increasing meat and egg production. *Animal Husbandry of Russia*. 2023; (1): 12–14 (in Russian). EDN BKNRDW
3. Gonova O.V., Malygin A.A., Lukina V.A., Vorobyova O.K. Modernization of dairy and meat cattle breeding in agricultural formations: innovative approach. *Modern high technologies. Regional application*. 2021; (4): 86–92 (in Russian). EDN GQQZLO
4. Yarkova T.M. The status and problems of dairy cattle breeding in Russia. *Food Policy and Security*. 2024; 11(1): 119–134 (in Russian). EDN OJJAQK
5. Sadovskaya T.N. Lactoferrin, its properties, production and application in zootechnics and veterinary medicine. *Fundamental and applied science: topical issues of theory and practice. Collection of articles from the IV International scientific and practical conference*. Penza: Nauka i Prosveshcheniye. 2023; 66–70 (in Russian). EDN SQQLXX
6. Ashraf M.F. et al. Nutraceutical and Health-Promoting Potential of Lactoferrin, an Iron-Binding Protein in Human and Animal: Current Knowledge. *Biological Trace Element Research*. 2024; 202(1): 56–72. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03658-4>
7. Demir R., Saritaş S., Bechelany M., Karav S. Lactoferrin: Properties and Potential Uses in the Food Industry. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(4): 1404. <https://doi.org/10.3390/ijms26041404>
8. Gudok A.A., Deykin A.V. Lactoferrin — prospects for use in the food, pharmaceutical and agricultural industries. *Collection of scientific papers of the All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Breeding*. 2016; 9(1): 421–424 (in Russian). EDN WJGTH

9. Pierce A. *et al.* Molecular cloning and sequence analysis of bovine lactotransferrin. *European Journal of Biochemistry*. 1991; 196(1): 177–184.
<https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1991.tb15801.x>
10. Wang B., Timilsena Y.P., Blanch E., Adhikari B. Lactoferrin: Structure, function, denaturation and digestion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019; 59(4): 580–596.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1381583>
11. Трубицина Т.П. и др. Проблемы и перспективы использования рекомбинантного лактоферрина человека и его производных. *Проблемы биологии продуктивных животных*. 2018; (4): 5–26.
<https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.3.5-26>
12. Зорина В.Н. Структура и ингибирующая активность лактоферрина по отношению к вирусу гриппа. *Инфекция и иммунитет*. 2020; 10(1): 49–54.
<https://doi.org/10.15789/2220-7619-POL-1156>
13. Arcella A. *et al.* In vitro and in vivo effect of human lactoferrin on glioblastoma growth. *Journal of Neurosurgery*. 2015; 123(4): 1026–1035.
<https://doi.org/10.3171/2014.12.jns14512>
14. Baker E.N., Baker H.M. A structural framework for understanding the multifunctional character of lactoferrin. *Biochimie*. 2009; 91(1): 3–10.
<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.05.006>
15. Baker H.M., Baker E.N. Lactoferrin and Iron: structural and dynamic aspects of binding and release. *BioMetals*. 2004; 17(3): 209–216.
<https://doi.org/10.1023/B:BIOM.0000027694.40260.70>
16. Lönnnerdal B. Nutritional and physiologic significance of human milk proteins. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2003; 77(6): 1537S–1543S.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/77.6.1537S>
17. Pan Y., Rowney M., Guo P., Hobman P. Biological properties of lactoferrin: an overview. *Australian Journal of Dairy Technology*. 2007; 62(1): 31–42.
18. Siqueiros-Cendón T., Arévalo-Gallegos S., Iglesias-Figueroa B.F., García-Montoya I.A., Salazar-Martínez J., Rascon-Cruz Q. Immunomodulatory effects of lactoferrin. *Acta Pharmacologica Sinica*. 2014; 35(5): 557–566.
<https://doi.org/10.1038/aps.2013.200>
19. Czosnykowska-Łukacka M., Orczyk-Pawłowicz M., Broers B., Królak-Olejnik B. Lactoferrin in Human Milk of Prolonged Lactation. *Nutrients*. 2019; 11(10): 2350.
<https://doi.org/10.3390/nu11102350>
20. Sánchez L., Aranda P., Pérez M., Calvo M. Concentration of Lactoferrin and Transferrin throughout Lactation in Cow's Colostrum and Milk. *Biological Chemistry*. 1988; 369(2): 1005–1008.
<https://doi.org/10.1515/bchm3.1988.369.2.1005>
21. Hiss S., Meyer T., Sauerwein H. Lactoferrin concentrations in goat milk throughout lactation. *Small Ruminant Research*. 2008; 80(1–3): 87–90.
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.07.027>
22. Conesa C. *et al.* Isolation of lactoferrin from milk of different species: Calorimetric and antimicrobial studies. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*. 2008; 150(1): 131–139.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.02.005>
23. Konuspayeva G., Serikbayeva A., Loiseau G., Narmuratova M., Faye B. Lactoferrin of camel milk of Kazakhstan. Faye B., Esenov P. (eds.). *Desertification Combat and Food Safety: The Added Value of Camel Producers*. IOS Press. 2005; 158–167.
24. Montagne P., Cuillière M.L., Molé C., Béné M.C., Faure G. Changes in Lactoferrin and Lysozyme Levels in Human Milk During the First Twelve Weeks of Lactation. Newburg D.S. (ed.). *Bioactive Components of Human Milk*. Boston, MA: Springer. 2001; 241–247.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1371-1_30
25. Kehoe S.I., Jayarao B.M., Heinrichs A.J. A survey of bovine colostrum composition and colostrum management practices on Pennsylvania dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(9): 4108–4116.
<https://doi.org/10.3168/jds.2007-0040>
26. Konuspayeva G., Faye B., Loiseau G., Levieux D. Lactoferrin and immunoglobulin contents in camel's milk (*Camelus bactrianus*, *Camelus dromedarius*, and Hybrids) from Kazakhstan. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(1): 38–46.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)72606-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72606-1)
27. Goldman I.L., Deikin A.V., Sadchikova E.R. Human Lactoferrin Can Be Alternative to Antibiotics. *Proceedings of the World medical conference*. WSEAS Press. 2010; 27–38.
EDN FIAXCE
28. Канышкова Т.Г., Бунева В.Н., Невинский Г.А. Лактоферрин и его биологические функции. Обзор. *Биохимия*. 2001; 66(1): 5–13.
EDN MPRKHN
29. Фомина У.О., Тутова О.А. Изучение антибактериальных свойств лактоферрина и возможности его применения в ветеринарии. *Молодежная наука — развитию агропромышленного комплекса. Материалы IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Курск: Курский государственный аграрный университет. 2024; 2: 415–420.
EDN AHQUOT
9. Pierce A. *et al.* Molecular cloning and sequence analysis of bovine lactotransferrin. *European Journal of Biochemistry*. 1991; 196(1): 177–184.
<https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1991.tb15801.x>
10. Wang B., Timilsena Y.P., Blanch E., Adhikari B. Lactoferrin: Structure, function, denaturation and digestion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019; 59(4): 580–596.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1381583>
11. Trubitsina T.P. *et al.* Problems and prospects of using recombinant human lactoferrin and its derivatives. *Problems of productive animal biology*. 2018; (4): 5–26 (in Russian).
<https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.3.5-26>
12. Zorina V.N. Pattern of lactoferrin anti-influenza virus inhibitory activity. *Russian Journal of Infection and Immunity*. 2020; 10(1): 49–54 (in Russian).
<https://doi.org/10.15789/2220-7619-POL-1156>
13. Arcella A. *et al.* In vitro and in vivo effect of human lactoferrin on glioblastoma growth. *Journal of Neurosurgery*. 2015; 123(4): 1026–1035.
<https://doi.org/10.3171/2014.12.jns14512>
14. Baker E.N., Baker H.M. A structural framework for understanding the multifunctional character of lactoferrin. *Biochimie*. 2009; 91(1): 3–10.
<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.05.006>
15. Baker H.M., Baker E.N. Lactoferrin and Iron: structural and dynamic aspects of binding and release. *BioMetals*. 2004; 17(3): 209–216.
<https://doi.org/10.1023/B:BIOM.0000027694.40260.70>
16. Lönnnerdal B. Nutritional and physiologic significance of human milk proteins. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2003; 77(6): 1537S–1543S.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/77.6.1537S>
17. Pan Y., Rowney M., Guo P., Hobman P. Biological properties of lactoferrin: an overview. *Australian Journal of Dairy Technology*. 2007; 62(1): 31–42.
18. Siqueiros-Cendón T., Arévalo-Gallegos S., Iglesias-Figueroa B.F., García-Montoya I.A., Salazar-Martínez J., Rascon-Cruz Q. Immunomodulatory effects of lactoferrin. *Acta Pharmacologica Sinica*. 2014; 35(5): 557–566.
<https://doi.org/10.1038/aps.2013.200>
19. Czosnykowska-Łukacka M., Orczyk-Pawłowicz M., Broers B., Królak-Olejnik B. Lactoferrin in Human Milk of Prolonged Lactation. *Nutrients*. 2019; 11(10): 2350.
<https://doi.org/10.3390/nu11102350>
20. Sánchez L., Aranda P., Pérez M., Calvo M. Concentration of Lactoferrin and Transferrin throughout Lactation in Cow's Colostrum and Milk. *Biological Chemistry*. 1988; 369(2): 1005–1008.
<https://doi.org/10.1515/bchm3.1988.369.2.1005>
21. Hiss S., Meyer T., Sauerwein H. Lactoferrin concentrations in goat milk throughout lactation. *Small Ruminant Research*. 2008; 80(1–3): 87–90.
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.07.027>
22. Conesa C. *et al.* Isolation of lactoferrin from milk of different species: Calorimetric and antimicrobial studies. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*. 2008; 150(1): 131–139.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2008.02.005>
23. Konuspayeva G., Serikbayeva A., Loiseau G., Narmuratova M., Faye B. Lactoferrin of camel milk of Kazakhstan. Faye B., Esenov P. (eds.). *Desertification Combat and Food Safety: The Added Value of Camel Producers*. IOS Press. 2005; 158–167.
24. Montagne P., Cuillière M., Mole C., Bene M., Faure G. Changes in lactoferrin and lysozyme levels in human milk during the first twelve weeks of lactation. *Bioactive compounds in human milk*. 2001; 501: 241–247.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1371-1_30
25. Kehoe S.I., Jayarao B.M., Heinrichs A.J. A survey of bovine colostrum composition and colostrum management practices on Pennsylvania dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(9): 4108–4116.
<https://doi.org/10.3168/jds.2007-0040>
26. Konuspayeva G., Faye B., Loiseau G., Levieux D. Lactoferrin and immunoglobulin contents in camel's milk (*Camelus bactrianus*, *Camelus dromedarius*, and Hybrids) from Kazakhstan. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(1): 38–46.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)72606-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72606-1)
27. Goldman I.L., Deikin A.V., Sadchikova E.R. Human Lactoferrin Can Be Alternative to Antibiotics. *Proceedings of the World medical conference*. WSEAS Press. 2010; 27–38.
EDN FIAXCE
28. Kanyshkova T.G., Buneva V.N., Nevinsky G.A. Lactoferrin and Its Biological Functions. *Biochemistry (Moscow)*. 2001; 66(1): 1–7.
<https://doi.org/10.1023/A:1002817226110>
29. Fomina U.O., Tutova O.A. Study of antibacterial properties lactoferrin and the possibilities of its use in veterinary medicine. *Youth science — for the development of the agro-industrial complex. Proceedings of the IV International scientific and practical conference of students, graduate students, and young scientists*. Kursk: Kursk State Agrarian University. 2024; 2: 415–420 (in Russian).
EDN AHQUOT

30. Борисов Н. Заменители цельного молока для телят: использовать или нет? *Эффективное животноводство*. 2021; (2): 79–85. EDN CJDRLR
31. Лукашевич В.С. и др. Получение рекомбинантного лактоферрина человека из молока коз-производителей и его физиологические эффекты. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2016; 60(1): 72–81. EDN VSPOMT
32. Метлева А.С., Вацуева Н.Н. Лактоферрин: проблемы и перспективы использования в ветеринарии (обзор). *Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы. Материалы IX Национальной научно-практической конференции с международным участием*. Кемерово: Кузбасская ГСХА. 2022; 686–689. EDN KFLGZC
33. Гудок А.А., Дейкин А.В. Лактоферрин: перспективы использования и анализ имеющихся результатов. *Russian Scientist*. 2017; 1(1): 3–12. EDN PAYMRB
34. Бухарин О.В., Валышев А.В., Валышева И.В. Роль лактоферрина в противомикробной защите. *Успехи современной биологии*. 2011; 131(2): 135–144. EDN NTRVJF
35. Chen P.-W., Jheng T.T., Shyu C.-L., Mao F.C. Antimicrobial potential for the combination of bovine lactoferrin or its hydrolysate with lactoferrin-resistant probiotics against foodborne pathogens. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(3): 1438–1446. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6112>
36. Зорина В.Н., Воробьева О.Н., Зорин Н.А. Активность лактоферрина различного происхождения в отношении грамположительных кокков и *Candida albicans*. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2018; 95(2): 54–58. <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2018-2-54-58>
37. Jenssen H., Hancock R.E.W. Antimicrobial properties of lactoferrin. *Biochimie*. 2009; 91(1): 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.05.015>
38. Anand N., Kanwar R.K., Sehgal R., Kanwar J.R. Antiparasitic and Immunomodulatory Potential of Oral Nanocapsules Encapsulated Lactoferrin Protein Against *Plasmodium Berghei*. *Nanomedicine*. 2016; 11(1): 47–62. <https://doi.org/10.2217/nnm.15.181>
39. Yen C.-C. et al. Lactoferrin: an iron-binding antimicrobial protein against *Escherichia coli* infection. *BioMetals*. 2011; 24(4): 585–594. <https://doi.org/10.1007/s10534-011-9423-8>
40. Legrand D., Pierce A., Ellass E., Carpentier M., Mariller C., Mazurier J. Lactoferrin Structure and Functions. Bösze Z. (ed.). *Bioactive Components of Milk*. New York, NY: Springer. 2008; 163–194. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74087-4_6
41. Zarzosa-Moreno D. et al. Lactoferrin and Its Derived Peptides: An Alternative for Combating Virulence Mechanisms Developed by Pathogens. *Molecules*. 2020; 25(24): 5763. <https://doi.org/10.3390/molecules25245763>
42. Кот А.Н., Петрушко Е.В., Бudevich А.И., Приловская Е.И., Михайлова О.И., Убушаев Б.С. Физиологическое состояние и продуктивность теллят при скормливании молока коз, содержащего рекомбинантный лактоферрин человека. *Зоотехническая наука Беларуси*. 2022; 57(1): 235–243. <https://doi.org/10.47612/0134-9732-2022-57-1-235-243>
43. Wróbel M., Małaczewska J., Kaczorek-Łukowska E. Antiviral Effect of Bovine Lactoferrin against Enterovirus E. *Molecules*. 2022; 27(17): 5569. <https://doi.org/10.3390/molecules27175569>
44. Титов Е.И., Тихомирова Н.А., Ионова И.И. Выделение и изучение железосвязывающей способности лактоферрина коровьего молока. *Вопросы питания*. 2019; 88(1): 91–96. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10011>
45. Puddu P., Borghi P., Gessani S., Valenti P., Belardelli F., Seganti L. Antiviral effect of bovine lactoferrin saturated with metal ions on early steps of human immunodeficiency virus type 1 infection. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*. 1998; 30(9): 1055–1063. [https://doi.org/10.1016/S1357-2725\(98\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S1357-2725(98)00066-1)
46. Małaczewska J., Kaczorek-Łukowska E., Wójcik R., Siwicki A.K. Antiviral effects of nisin, lysozyme, lactoferrin and their mixtures against bovine viral diarrhoea virus. *BMC Veterinary Research*. 2019; 15: 318. <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2067-6>
47. Метлева А.С. Влияние лактоферрина на гематологические показатели крови и кишечную микрофлору телят с диареей. *Инновационные решения в АПК*. 2024; (2): 63–73. EDN VNFGIK
48. Habing G., Harris K., Schuenemann G.M., Piñeiro J.M., Lakritz J., Clavijo X.A. Lactoferrin reduces mortality in preweaned calves with diarrhoea. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(5): 3940–3948. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11969>
30. Borisov N. Whole milk replacers for calves: to use or not?. *Effektivnoye zhivotnovodstvo*. 2021; (2): 79–85 (in Russian). EDN CJDRLR
31. Lukashevich V.S. et al. Production of recombinant human lactoferrin from the milk of goat-producers and its physiological effects. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2016; 60(1): 72–81 (in Russian). EDN VSPOMT
32. Metleva A.S., Vatsueva N.N. Lactoferrin: problems and prospects of use in veterinary medicine (review). *Relevant scientific and technical means and agricultural problems. Proceedings of the IX National scientific and practical conference with international participation*. Kemerovo: Kuzbass State Agricultural Academy. 2022; 686–689 (in Russian). EDN KFLGZC
33. Gudok A.A., Deykin A.V. Lactoferrin: use prospects and analysis of actual results. *Russian Scientist*. 2017; 1(1): 3–12 (in Russian). EDN PAYMRB
34. Bukharin O.V., Valyshev A.V., Valysheva I.V. The role of lactoferrin in anti-infectious defense. *Advances in Current Biology*. 2011; 131(2): 135–144 (in Russian). EDN NTRVJF
35. Chen P.-W., Jheng T.T., Shyu C.-L., Mao F.C. Antimicrobial potential for the combination of bovine lactoferrin or its hydrolysate with lactoferrin-resistant probiotics against foodborne pathogens. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(3): 1438–1446. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6112>
36. Zorina V.N., Vorobyova O.N., Zorin N.A. Antimicrobial activity of the human and bovine lactoferrin against gram-positive bacteria and *Candida albicans*. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2018; 95(2): 54–58 (in Russian). <https://doi.org/10.36233/0372-9311-2018-2-54-58>
37. Jenssen H., Hancock R.E.W. Antimicrobial properties of lactoferrin. *Biochimie*. 2009; 91(1): 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.05.015>
38. Anand N., Kanwar R.K., Sehgal R., Kanwar J.R. Antiparasitic and Immunomodulatory Potential of Oral Nanocapsules Encapsulated Lactoferrin Protein Against *Plasmodium Berghei*. *Nanomedicine*. 2016; 11(1): 47–62. <https://doi.org/10.2217/nnm.15.181>
39. Yen C.-C. et al. Lactoferrin: an iron-binding antimicrobial protein against *Escherichia coli* infection. *BioMetals*. 2011; 24(4): 585–594. <https://doi.org/10.1007/s10534-011-9423-8>
40. Legrand D., Pierce A., Ellass E., Carpentier M., Mariller C., Mazurier J. Lactoferrin Structure and Functions. Bösze Z. (ed.). *Bioactive Components of Milk*. New York, NY: Springer. 2008; 163–194. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74087-4_6
41. Zarzosa-Moreno D. et al. Lactoferrin and Its Derived Peptides: An Alternative for Combating Virulence Mechanisms Developed by Pathogens. *Molecules*. 2020; 25(24): 5763. <https://doi.org/10.3390/molecules25245763>
42. Kot A.N., Petrushko E.V., Budevich A.I., Prilovskaya E.I., Mikhailova O.I., Ubushaev B.S. Physiological state and productivity of calves fed goat milk containing recombinant human lactoferrin. *Zootechnical Science of Belarus*. 2022; 57(1): 235–243 (in Russian). <https://doi.org/10.47612/0134-9732-2022-57-1-235-243>
43. Wróbel M., Małaczewska J., Kaczorek-Łukowska E. Antiviral Effect of Bovine Lactoferrin against Enterovirus E. *Molecules*. 2022; 27(17): 5569. <https://doi.org/10.3390/molecules27175569>
44. Titov E.I., Tikhomirova N.A., Ionova I.I. Investigation of the iron-binding capacity of the bovine lactoferrin. *Problems of nutrition*. 2019; 88(1): 91–96 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10011>
45. Puddu P., Borghi P., Gessani S., Valenti P., Belardelli F., Seganti L. Antiviral effect of bovine lactoferrin saturated with metal ions on early steps of human immunodeficiency virus type 1 infection. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*. 1998; 30(9): 1055–1063. [https://doi.org/10.1016/S1357-2725\(98\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S1357-2725(98)00066-1)
46. Małaczewska J., Kaczorek-Łukowska E., Wójcik R., Siwicki A.K. Antiviral effects of nisin, lysozyme, lactoferrin and their mixtures against bovine viral diarrhoea virus. *BMC Veterinary Research*. 2019; 15: 318. <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2067-6>
47. Metleva A.S. The effect of lactoferrin on hematological parameters of blood and intestinal microflora of calves with diarrhoea. *Innovative solutions in the agro-industrial complex*. 2024; (2): 63–73 (in Russian). EDN VNFGIK
48. Habing G., Harris K., Schuenemann G.M., Piñeiro J.M., Lakritz J., Clavijo X.A. Lactoferrin reduces mortality in preweaned calves with diarrhoea. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(5): 3940–3948. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11969>

49. Pempek J.A., Watkins L.R., Bruner C.E., Habing G.G. A multisite, randomized field trial to evaluate the influence of lactoferrin on the morbidity and mortality of dairy calves with diarrhea. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(10): 9259–9267. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16476>
50. Jahani S., Shakiba A., Jahani L. The Antimicrobial Effect of Lactoferrin on Gram-Negative and Gram-Positive Bacteria. *International Journal of Infection*. 2015; 2(3): e27954. <https://doi.org/10.17795/iji27594>
51. Радчиков В.Ф., Кот А.Н., Петрушко Е.В., Приловская Е.И. Продуктивное действие лактоферрина в рационах телят. *Актуальные проблемы ветеринарии и интенсивного животноводства. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции*. Брянск: Брянский ГАУ. 2025; 1: 191–195. EDN YDDFZN
52. Богданович Д.М., Петрушко Е.В. Экспрессия рекомбинантного лактоферрина человека в молоке коз-производителей в течение года. *Новости науки в АПК*. 2018; (2): 168–171. EDN UISYDA
53. Lu J. *et al.* Antibacterial and Anti-biofilm Activity of the Human Breast Milk Glycoprotein Lactoferrin against Group B *Streptococcus*. *ChemBioChem*. 2021; 22(12): 2124–2133. <https://doi.org/10.1002/cbic.202100016>
54. Ochoa T.J., Cleary T.G. Effect of lactoferrin on enteric pathogens. *Biochimie*. 2009; 91(1): 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.04.006>
55. Gomez H.F., Ochoa T.J., Carlin L.G., Cleary T.G. Human lactoferrin impairs virulence of *Shigella flexneri*. *The Journal of Infectious Diseases*. 2003; 187(1): 87–95. <https://doi.org/10.1086/345875>
56. Massucci M.T. *et al.* Proteolytic activity of bovine lactoferrin. *BioMetals*. 2004; 17(3): 249–255. <https://doi.org/10.1023/b:biom.0000027700.90780.45>
57. Ongena R., Dierick M., Vanrompay D., Cox E., Devriendt B. Lactoferrin impairs pathogen virulence through its proteolytic activity. *Frontiers in Veterinary Science*. 2024; 11: 1428156. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1428156>
58. García-Montoya I.A., Siqueiros Cendón T., Arévalo-Gallegos S., Rascón-Cruz Q. Lactoferrin a multiple bioactive protein: An overview. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*. 2012; 1820(3): 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2011.06.018>
59. Valenti P., Antonini G. Lactoferrin. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2005; 62(22): 2576–2587. <https://doi.org/10.1007/s00018-005-5372-0>
60. Dierick M., Van der Weken H., Rybarczyk J., Vanrompay D., Devriendt B., Cox E. Porcine and Bovine Forms of Lactoferrin Inhibit Growth of Porcine Enterotoxigenic *Escherichia coli* and Degrade Its Virulence Factors. *Applied and Environmental Microbiology*. 2020; 86(24): e00524-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00524-20>
61. Bhimani R.S., Vendrov Y., Furmanski P. Influence of lactoferrin feeding and injection against systemic staphylococcal infections in mice. *Journal of Applied Microbiology*. 1999; 86(1): 135–144. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1999.00644.x>
62. Lee H.-Y. *et al.* Potential antimicrobial effects of human lactoferrin against oral infection with *Listeria monocytogenes* in mice. *Journal of Medical Microbiology*. 2005; 54(11): 1049–1054. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.45918-0>
63. Kuttila T., Pyörälä S., Saloniemi H., Kaartinen L. Antibacterial Effect of Bovine Lactoferrin Against Udder Pathogens. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2003; 44(1): 35–42. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-44-35>
64. González-Chávez S.A., Arévalo-Gallegos S., Rascón-Cruz Q. Lactoferrin: structure, function and applications. *International Journal of Antimicrobial Agents*. 2009; 33(4): 301.e1–301.e8. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2008.07.020>
65. Luna-Castro S., Aguilar-Romero F., Samaniego-Barrón L., Godínez-Vargas D., de la Garza M. Effect of bovine apo-lactoferrin on the growth and virulence of *Actinobacillus pleuropneumoniae*. *BioMetals*. 2014; 27(5): 891–903. <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9752-5>
66. Самохина Л.С., Ганина В.И., Ионова И.И., Комолова Г.С., Головин М.А. Бифидогенные свойства пептидов лактоферрина из коровьего молока. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2016; 19(2): 49–53. EDN VRXWBP
67. Богданович Д.М., Приловская Е.И. Использование лактоферрина в кормлении телят. *Аграрная наука в условиях модернизации и цифрового развития АПК России. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции*. Курган: Курганская ГСХА. 2022; 82–85. EDN BKXIKX
49. Pempek J.A., Watkins L.R., Bruner C.E., Habing G.G. A multisite, randomized field trial to evaluate the influence of lactoferrin on the morbidity and mortality of dairy calves with diarrhea. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(10): 9259–9267. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16476>
50. Jahani S., Shakiba A., Jahani L. The Antimicrobial Effect of Lactoferrin on Gram-Negative and Gram-Positive Bacteria. *International Journal of Infection*. 2015; 2(3): e27954. <https://doi.org/10.17795/iji27594>
51. Radchikov V.F., Kot A.N., Petruschko E.V., Prilovskaya E.I. The productive effect of lactoferrin in calves' diets. *Actual problems of veterinary science and intensive animal husbandry. Collected papers of the IV International scientific and practical conference*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 1: 191–195 (in Russian). EDN YDDFZN
52. Bogdanovich D.M., Petruschko E.V. Expression of recombinant human lactoferrin in the milk of goat-producers during the year. *Novosti nauki v APK*. 2018; (2): 168–171 (in Russian). EDN UISYDA
53. Lu J. *et al.* Antibacterial and Anti-biofilm Activity of the Human Breast Milk Glycoprotein Lactoferrin against Group B *Streptococcus*. *ChemBioChem*. 2021; 22(12): 2124–2133. <https://doi.org/10.1002/cbic.202100016>
54. Ochoa T.J., Cleary T.G. Effect of lactoferrin on enteric pathogens. *Biochimie*. 2009; 91(1): 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.04.006>
55. Gomez H.F., Ochoa T.J., Carlin L.G., Cleary T.G. Human lactoferrin impairs virulence of *Shigella flexneri*. *The Journal of Infectious Diseases*. 2003; 187(1): 87–95. <https://doi.org/10.1086/345875>
56. Massucci M.T. *et al.* Proteolytic activity of bovine lactoferrin. *BioMetals*. 2004; 17(3): 249–255. <https://doi.org/10.1023/b:biom.0000027700.90780.45>
57. Ongena R., Dierick M., Vanrompay D., Cox E., Devriendt B. Lactoferrin impairs pathogen virulence through its proteolytic activity. *Frontiers in Veterinary Science*. 2024; 11: 1428156. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1428156>
58. García-Montoya I.A., Siqueiros Cendón T., Arévalo-Gallegos S., Rascón-Cruz Q. Lactoferrin a multiple bioactive protein: An overview. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*. 2012; 1820(3): 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2011.06.018>
59. Valenti P., Antonini G. Lactoferrin. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2005; 62(22): 2576–2587. <https://doi.org/10.1007/s00018-005-5372-0>
60. Dierick M., Van der Weken H., Rybarczyk J., Vanrompay D., Devriendt B., Cox E. Porcine and Bovine Forms of Lactoferrin Inhibit Growth of Porcine Enterotoxigenic *Escherichia coli* and Degrade Its Virulence Factors. *Applied and Environmental Microbiology*. 2020; 86(24): e00524-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00524-20>
61. Bhimani R.S., Vendrov Y., Furmanski P. Influence of lactoferrin feeding and injection against systemic staphylococcal infections in mice. *Journal of Applied Microbiology*. 1999; 86(1): 135–144. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1999.00644.x>
62. Lee H.-Y. *et al.* Potential antimicrobial effects of human lactoferrin against oral infection with *Listeria monocytogenes* in mice. *Journal of Medical Microbiology*. 2005; 54(11): 1049–1054. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.45918-0>
63. Kuttila T., Pyörälä S., Saloniemi H., Kaartinen L. Antibacterial Effect of Bovine Lactoferrin Against Udder Pathogens. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2003; 44(1): 35–42. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-44-35>
64. González-Chávez S.A., Arévalo-Gallegos S., Rascón-Cruz Q. Lactoferrin: structure, function and applications. *International Journal of Antimicrobial Agents*. 2009; 33(4): 301.e1–301.e8. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2008.07.020>
65. Luna-Castro S., Aguilar-Romero F., Samaniego-Barrón L., Godínez-Vargas D., de la Garza M. Effect of bovine apo-lactoferrin on the growth and virulence of *Actinobacillus pleuropneumoniae*. *BioMetals*. 2014; 27(5): 891–903. <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9752-5>
66. Samokhina L.S., Ganina V.I., Ionova I.I., Komolova G.S., Golovin M.A. Bifidogenic properties of lactoferrin peptides of cow milk. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2016; 19(2): 49–53 (in Russian). EDN VRXWBP
67. Bogdanovich D.M., Prilovskaya E.I. The use of lactoferrin in feeding calves. *Agricultural science in the context of modernization and digital development of the Russian agro-industrial complex. Collection of articles based on the materials of the International scientific and practical conference*. Kurgan: Kurgan State Agricultural Academy. 2022; 82–85 (in Russian). EDN BKXIKX

68. Xu G. *et al.* Lactoferrin-derived peptides and Lactoferricin chimera inhibit virulence factor production and biofilm formation in *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Applied Microbiology*. 2010; 109(4): 1311–1318. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04751.x>
69. Paredes J.L., Sparks H., White A.C.Jr., Martinez-Traverso G., Ochoa T., Castellanos-González A. Killing of *Cryptosporidium* sporozoites by Lactoferrin. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 2017; 97(3): 774–776. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.16-0804>
70. Berlutti F. *et al.* Both lactoferrin and iron influence aggregation and biofilm formation in *Streptococcus mutans*. *BioMetals*. 2004; 17(3): 271–278. <https://doi.org/10.1023/B:BIOM.0000027704.53859.d3>
71. Богданович Д.М., Бровко Т.Н., Шевцов И.Н., Гливанская О.И., Гродникова Н.А. Влияние рекомбинантного лактоферрина человека на биологическую полноценность и санитарное качество спермы хряков. *Зоотехническая наука Беларуси*. 2018; 53(1): 21–28. EDN YNDKPB
72. Velusamy S.K., Fine D.H., Velliyagounder K. Prophylactic effect of human lactoferrin against *Streptococcus mutans* bacteremia in lactoferrin knockout mice. *Microbes and Infection*. 2014; 16(9): 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2014.07.009>
73. Hwang S.-A., Kruzel M.L., Actor J.K. Immunomodulatory effects of recombinant lactoferrin during MRSA infection. *International Immunopharmacology*. 2014; 20(1): 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2014.02.029>
74. Gomes F., Henriques M. Control of Bovine Mastitis: Old and Recent Therapeutic Approaches. *Current Microbiology*. 2016; 72(4): 377–382. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0958-8>
75. Shimazaki K.-i., Kawai K. Advances in lactoferrin research concerning bovine mastitis. *Biochemistry and Cell Biology*. 2017; 95(1): 69–75. <https://doi.org/10.1139/bcb-2016-0044>
76. Simojoki H., Hyvönen P., Orro T., Pyörälä S. High concentration of human lactoferrin in milk of rhLf-transgenic cows relieves signs of bovine experimental *Staphylococcus chromogenes* intramammary infection. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2010; 136(3–): 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2010.03.017>
77. Barrington K.J., Assaad M.-A., Janvier A. The Lacuna Trial: a double-blind randomized controlled pilot trial of lactoferrin supplementation in the very preterm infant. *Journal of Perinatology*. 2016; 36(8): 666–669. <https://doi.org/10.1038/jp.2016.24>
78. Kieckens E., Rybarczyk J., Cox E., Vanrompay D. Antibacterial and immunomodulatory activities of bovine lactoferrin against *Escherichia coli* O157:H7 infections in cattle. *BioMetals*. 2018; 31(3): 321–330. <https://doi.org/10.1007/s10534-018-0082-x>
79. Tanhaiean A., Azghandi M., Razmyar J., Mohammadi E., Sekhavati M.H. Recombinant production of a chimeric antimicrobial peptide in *E. coli* and assessment of its activity against some avian clinically isolated pathogens. *Microbial Pathogenesis*. 2018; 122: 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.06.012>
80. Giansanti F., Panella G., Leboffe L., Antonini G. Lactoferrin from milk: Nutraceutical and Pharmacological Properties. *Pharmaceuticals*. 2016; 9(4): 61. <https://doi.org/10.3390/ph9040061>
81. Frontera L.S., Moyano S., Quassollo G., Lanfredi-Rangel A., Rópolo A.S., Touz M.C. Lactoferrin and lactoferricin endocytosis halt *Giardia* cell growth and prevent infective cyst production. *Scientific Reports*. 2018; 8: 18020. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36563-1>
82. Sinnis P., Willnow T.E., Briones M.R., Herz J., Nussenzweig V. Remnant lipoproteins inhibit malaria sporozoite invasion of hepatocytes. *The Journal of Experimental Medicine*. 1996; 184(3): 945–954. <https://doi.org/10.1084/jem.184.3.945>
83. Abd El Monsef *et al.* Effects of prebiotic (lactoferrin) and diclazuril on broiler chickens experimentally infected with *Eimeria tenella*. *Frontiers in Veterinary Science*. 2024; 11: 1416459. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1416459>
84. Fernandes K.E., Carter D.A. The Antifungal Activity of Lactoferrin and Its Derived Peptides: Mechanisms of Action and Synergy with Drugs against Fungal Pathogens. *Frontiers in Microbiology*. 2017; 8: 2. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00002>
85. Pang C.N.I., Lai Y.-W., Campbell L.T., Chen S.C.-A., Carter D.A., Wilkins M.R. Transcriptome and network analyses in *Saccharomyces cerevisiae* reveal that amphotericin B and lactoferrin synergy disrupt metal homeostasis and stress response. *Scientific Reports*. 2017; 7: 40232. <https://doi.org/10.1038/srep40232>
86. Fernandes K.E., Weeks K., Carter D.A. Lactoferrin Is Broadly Active against Yeasts and Highly Synergistic with Amphotericin B. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2020; 64(5): e02284-19. <https://doi.org/10.1128/aac.02284-19>
68. Xu G. *et al.* Lactoferrin-derived peptides and Lactoferricin chimera inhibit virulence factor production and biofilm formation in *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Applied Microbiology*. 2010; 109(4): 1311–1318. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04751.x>
69. Paredes J.L., Sparks H., White A.C.Jr., Martinez-Traverso G., Ochoa T., Castellanos-González A. Killing of *Cryptosporidium* sporozoites by Lactoferrin. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 2017; 97(3): 774–776. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.16-0804>
70. Berlutti F. *et al.* Both lactoferrin and iron influence aggregation and biofilm formation in *Streptococcus mutans*. *BioMetals*. 2004; 17(3): 271–278. <https://doi.org/10.1023/B:BIOM.0000027704.53859.d3>
71. Bogdanovich D.M., Brovko T.N., Shevtsov I.N., Glivanskaya O.I., Grodnikova N.A. Effect of recombinant human lactoferrin on biological full value and sanitary quality of boars' semen. *Zootechnical Science of Belarus*. 2018; 53(1): 21–28 (in Russian). EDN YNDKPB
72. Velusamy S.K., Fine D.H., Velliyagounder K. Prophylactic effect of human lactoferrin against *Streptococcus mutans* bacteremia in lactoferrin knockout mice. *Microbes and Infection*. 2014; 16(9): 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2014.07.009>
73. Hwang S.-A., Kruzel M.L., Actor J.K. Immunomodulatory effects of recombinant lactoferrin during MRSA infection. *International Immunopharmacology*. 2014; 20(1): 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2014.02.029>
74. Gomes F., Henriques M. Control of Bovine Mastitis: Old and Recent Therapeutic Approaches. *Current Microbiology*. 2016; 72(4): 377–382. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0958-8>
75. Shimazaki K.-i., Kawai K. Advances in lactoferrin research concerning bovine mastitis. *Biochemistry and Cell Biology*. 2017; 95(1): 69–75. <https://doi.org/10.1139/bcb-2016-0044>
76. Simojoki H., Hyvönen P., Orro T., Pyörälä S. High concentration of human lactoferrin in milk of rhLf-transgenic cows relieves signs of bovine experimental *Staphylococcus chromogenes* intramammary infection. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2010; 136(3–): 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2010.03.017>
77. Barrington K.J., Assaad M.-A., Janvier A. The Lacuna Trial: a double-blind randomized controlled pilot trial of lactoferrin supplementation in the very preterm infant. *Journal of Perinatology*. 2016; 36(8): 666–669. <https://doi.org/10.1038/jp.2016.24>
78. Kieckens E., Rybarczyk J., Cox E., Vanrompay D. Antibacterial and immunomodulatory activities of bovine lactoferrin against *Escherichia coli* O157:H7 infections in cattle. *BioMetals*. 2018; 31(3): 321–330. <https://doi.org/10.1007/s10534-018-0082-x>
79. Tanhaiean A., Azghandi M., Razmyar J., Mohammadi E., Sekhavati M.H. Recombinant production of a chimeric antimicrobial peptide in *E. coli* and assessment of its activity against some avian clinically isolated pathogens. *Microbial Pathogenesis*. 2018; 122: 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.06.012>
80. Giansanti F., Panella G., Leboffe L., Antonini G. Lactoferrin from milk: Nutraceutical and Pharmacological Properties. *Pharmaceuticals*. 2016; 9(4): 61. <https://doi.org/10.3390/ph9040061>
81. Frontera L.S., Moyano S., Quassollo G., Lanfredi-Rangel A., Rópolo A.S., Touz M.C. Lactoferrin and lactoferricin endocytosis halt *Giardia* cell growth and prevent infective cyst production. *Scientific Reports*. 2018; 8: 18020. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36563-1>
82. Sinnis P., Willnow T.E., Briones M.R., Herz J., Nussenzweig V. Remnant lipoproteins inhibit malaria sporozoite invasion of hepatocytes. *The Journal of Experimental Medicine*. 1996; 184(3): 945–954. <https://doi.org/10.1084/jem.184.3.945>
83. Abd El Monsef *et al.* Effects of prebiotic (lactoferrin) and diclazuril on broiler chickens experimentally infected with *Eimeria tenella*. *Frontiers in Veterinary Science*. 2024; 11: 1416459. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1416459>
84. Fernandes K.E., Carter D.A. The Antifungal Activity of Lactoferrin and Its Derived Peptides: Mechanisms of Action and Synergy with Drugs against Fungal Pathogens. *Frontiers in Microbiology*. 2017; 8: 2. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00002>
85. Pang C.N.I., Lai Y.-W., Campbell L.T., Chen S.C.-A., Carter D.A., Wilkins M.R. Transcriptome and network analyses in *Saccharomyces cerevisiae* reveal that amphotericin B and lactoferrin synergy disrupt metal homeostasis and stress response. *Scientific Reports*. 2017; 7: 40232. <https://doi.org/10.1038/srep40232>
86. Fernandes K.E., Weeks K., Carter D.A. Lactoferrin Is Broadly Active against Yeasts and Highly Synergistic with Amphotericin B. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2020; 64(5): e02284-19. <https://doi.org/10.1128/aac.02284-19>

87. Viejo-Díaz M., Andrés M.T., Fierro J.F. Modulation of In Vitro Fungicidal Activity of Human Lactoferrin against *Candida albicans* by Extracellular Cation Concentration and Target Cell Metabolic Activity. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2004; 48(4): 1242–1248. <https://doi.org/10.1128/aac.48.4.1242-1248.2004>
88. Brouwer C. *et al.* Synthetic Human Lactoferrin Peptide hLF(1–11) Shows Antifungal Activity and Synergism with Fluconazole and Anidulafungin Towards *Candida albicans* and Various Non-Albicans *Candida* Species, Including *Candidoizyia auris*. *Antibiotics*. 2025; 14(7): 671. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14070671>
89. Садчиков П.Е., Гольдман И.Л., Разин С.В., Черноусов А.Д., Алексеева Л.И., Садчикова Е.Р. Молекулярный механизм влияния лактоферрина на костеобразование. Критический обзор. *Остеопороз и остеопатии*. 2016; 19(3): 12–22. EDN YGDFNN
90. Li Q. *et al.* Effects of Recombinant Human Lactoferrin on Osteoblast Growth and Bone Status in Piglets. *Animal Biotechnology*. 2018; 29(2): 90–99. <https://doi.org/10.1080/10495398.2017.1313269>
91. Guo H.Y. *et al.* Orally Administered Lactoferrin Preserves Bone Mass and Microarchitecture in Ovariectomized Rats. *The Journal of Nutrition*. 2009; 139(5): 958–964. <https://doi.org/10.3945/jn.108.100586>
92. Saki A.A., Mahmoudi H. Effects of *in ovo* injection of bovine lactoferrin before incubation in layer breeder eggs on tibia measurements and performance of laying hens. *Animal*. 2015; 9(11): 1813–1819. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001093>
93. Klasing K.C., Humphrey B.D., Huang N. Rice Expressing Lactoferrin and Lysozyme Has Antibiotic-Like Properties When Fed to Chicks. *The Journal of Nutrition*. 2002; 132(6): 1214–1218. <https://doi.org/10.1093/jn/132.6.1214>
94. Lee S.H., de Boer H.A. Production of biomedical proteins in the milk of transgenic dairy cows: the state of the art. *Journal of Controlled Release*. 1994; 29(3): 213–221. [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0168-3659(94)90068-X)
95. Агвиевич И.С., Костеневич А.А., Фальковская У.В., Бирюков Р.Н. Мировая практика получения рекомбинантного человеческого лактоферрина (обзор). *Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты. Сборник научных трудов*. Минск: Белорусская наука. 2017; 9: 9–30. EDN KZXMIQ
96. Brock J.H. The physiology of lactoferrin. *Biochemistry and Cell Biology*. 2002; 80(1): 1–6. <https://doi.org/10.1139/o01-212>
97. Legrand D. Overview of Lactoferrin as a Natural Immune Modulator. *The Journal of Pediatrics*. 2016; 173(S): S10–S15. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2016.02.071>
98. Yang D., de la Rosa G., Tewary P., Oppenheim J.J. Alarmins link neutrophils and dendritic cells. *Trends in Immunology*. 2009; 30(11): 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.it.2009.07.004>
99. Dhennin-Duthille I., Masson M., Damiens E., Fillebeen C., Spik G., Mazurier J. Lactoferrin upregulates the expression of CD4 antigen through the stimulation of the mitogen-activated protein kinase in the human lymphoblastic T Jurkat cell line. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2000; 79(4): 583–593.
100. Iglesias-Figueroa B.F., Espinoza-Sánchez E.A., Siqueiros-Cendón T.S., Rascón-Cruz Q. Lactoferrin as a nutraceutical protein from milk, an overview. *International Dairy Journal*. 2019; 89: 37–41. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.09.004>
101. Приловская Е.И. Дефростированное молоко коз-производителей рекомбинантного лактоферрина в составе рациона телят в возрасте 1–30 дней. *Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. Сборник научных трудов*. Горки: БГСХА. 2023; 26(1): 136–144. EDN SIYED
102. Joslin R.S., Erickson P.S., Santoro H.M., Whitehouse N.L., Schwab C.G., Rejman J.J. Lactoferrin supplementation to dairy calves. *Journal of Dairy Science*. 2002; 85(5): 1237–1242. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74187-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74187-8)
103. Ma L., Zhu Y., Zhu La A.L.T., Lourenco J.M., Callaway T.R., Bu D. *Schizochytrium* sp. and lactoferrin supplementation alleviates *Escherichia coli* K99-induced diarrhea in preweaning dairy calves. *Journal of Dairy Science*. 2024; 107(3): 1603–1619. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23466>
104. Omar N.A., Abdel-Aziz A.M., Wafa W.M., El-Nagar H.A. Effect of lactoferrin supplementation on blood profile, immunity and growth performance in newly born calves. *Journal of the Egyptian Veterinary Medical Association*. 2022; 22: 229–245.
105. Prgomet C., Prenner M.L., Schwarz F.J., Pfaffl M.W. Effect of lactoferrin on selected immune system parameters and the gastrointestinal morphology in growing calves. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2007; 91(3–4): 109–119. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2006.00649.x>
87. Viejo-Díaz M., Andrés M.T., Fierro J.F. Modulation of In Vitro Fungicidal Activity of Human Lactoferrin against *Candida albicans* by Extracellular Cation Concentration and Target Cell Metabolic Activity. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2004; 48(4): 1242–1248. <https://doi.org/10.1128/aac.48.4.1242-1248.2004>
88. Brouwer C. *et al.* Synthetic Human Lactoferrin Peptide hLF(1–11) Shows Antifungal Activity and Synergism with Fluconazole and Anidulafungin Towards *Candida albicans* and Various Non-Albicans *Candida* Species, Including *Candidoizyia auris*. *Antibiotics*. 2025; 14(7): 671. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14070671>
89. Sadchikov P.E., Goldman I.L., Razin S.V., Chernousov A.D., Alekseeva L.I., Sadchikova E.R. The molecular mechanism of lactoferrin influence on bone formation. *Osteoporosis and Bone Diseases*. 2016; 19(3): 12–22 (in Russian). EDN YGDFNN
90. Li Q. *et al.* Effects of Recombinant Human Lactoferrin on Osteoblast Growth and Bone Status in Piglets. *Animal Biotechnology*. 2018; 29(2): 90–99. <https://doi.org/10.1080/10495398.2017.1313269>
91. Guo H.Y. *et al.* Orally Administered Lactoferrin Preserves Bone Mass and Microarchitecture in Ovariectomized Rats. *The Journal of Nutrition*. 2009; 139(5): 958–964. <https://doi.org/10.3945/jn.108.100586>
92. Saki A.A., Mahmoudi H. Effects of *in ovo* injection of bovine lactoferrin before incubation in layer breeder eggs on tibia measurements and performance of laying hens. *Animal*. 2015; 9(11): 1813–1819. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001093>
93. Klasing K.C., Humphrey B.D., Huang N. Rice Expressing Lactoferrin and Lysozyme Has Antibiotic-Like Properties When Fed to Chicks. *The Journal of Nutrition*. 2002; 132(6): 1214–1218. <https://doi.org/10.1093/jn/132.6.1214>
94. Lee S.H., de Boer H.A. Production of biomedical proteins in the milk of transgenic dairy cows: the state of the art. *Journal of Controlled Release*. 1994; 29(3): 213–221. [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0168-3659(94)90068-X)
95. Agievitch I.S., Kastsianevich A.A., Falkouskaya U.V., Birukou R.M. World practice for production of recombinant human lactoferrin (review). *Microbial biotechnology: fundamental and applied aspects. Collection of scientific papers*. Minsk: Belorusskaya nauka. 2017; 9: 9–30 (in Russian). EDN KZXMIQ
96. Brock J.H. The physiology of lactoferrin. *Biochemistry and Cell Biology*. 2002; 80(1): 1–6. <https://doi.org/10.1139/o01-212>
97. Legrand D. Overview of Lactoferrin as a Natural Immune Modulator. *The Journal of Pediatrics*. 2016; 173(S): S10–S15. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2016.02.071>
98. Yang D., de la Rosa G., Tewary P., Oppenheim J.J. Alarmins link neutrophils and dendritic cells. *Trends in Immunology*. 2009; 30(11): 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.it.2009.07.004>
99. Dhennin-Duthille I., Masson M., Damiens E., Fillebeen C., Spik G., Mazurier J. Lactoferrin upregulates the expression of CD4 antigen through the stimulation of the mitogen-activated protein kinase in the human lymphoblastic T Jurkat cell line. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2000; 79(4): 583–593.
100. Iglesias-Figueroa B.F., Espinoza-Sánchez E.A., Siqueiros-Cendón T.S., Rascón-Cruz Q. Lactoferrin as a nutraceutical protein from milk, an overview. *International Dairy Journal*. 2019; 89: 37–41. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.09.004>
101. Prilovskaya E.I. Defrosted milk of goats-producers of recombinant lactoferrin in the diet of calves aged 1–30 days. *Actual problems of intensive development of animal husbandry. Collection of scientific articles*. Gorki: Belarusian State Agricultural Academy. 2023; 26(1): 136–144 (in Russian). EDN SIYED
102. Joslin R.S., Erickson P.S., Santoro H.M., Whitehouse N.L., Schwab C.G., Rejman J.J. Lactoferrin supplementation to dairy calves. *Journal of Dairy Science*. 2002; 85(5): 1237–1242. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74187-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74187-8)
103. Ma L., Zhu Y., Zhu La A.L.T., Lourenco J.M., Callaway T.R., Bu D. *Schizochytrium* sp. and lactoferrin supplementation alleviates *Escherichia coli* K99-induced diarrhea in preweaning dairy calves. *Journal of Dairy Science*. 2024; 107(3): 1603–1619. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23466>
104. Omar N.A., Abdel-Aziz A.M., Wafa W.M., El-Nagar H.A. Effect of lactoferrin supplementation on blood profile, immunity and growth performance in newly born calves. *Journal of the Egyptian Veterinary Medical Association*. 2022; 22: 229–245.
105. Prgomet C., Prenner M.L., Schwarz F.J., Pfaffl M.W. Effect of lactoferrin on selected immune system parameters and the gastrointestinal morphology in growing calves. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2007; 91(3–4): 109–119. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2006.00649.x>

106. Cowles K.E., White R.A., Whitehouse N.L., Erickson P.S. Growth Characteristics of Calves Fed an Intensified Milk Replacer Regimen with Additional Lactoferrin. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(12): 4835–4845.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72532-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72532-2)
107. Mallaki M., Hosseinkhani A., Taghizadeh A., Paya H., Hamidian Gh. Effect of Lactoferrin and Probiotic on Health Status and Reduction of *Escherichia Coli* Infection in Ghezel Lambs in Prewaning Phase. *Veterinary Research and Biological Products*. 2021; 34(1): 55–62.
<https://doi.org/10.22092/vj.2020.128115.1634>
108. El-Ashker M., Risha E., Abdelhamid F., Ateya A. Potential immune modulating properties and antioxidant activity of supplementing commercially available lactoferrin and/or *Lactobacillus* sp. in healthy Ossimi lambs. *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2018; 21(4): 705–713.
<https://doi.org/10.24425/124309>
109. Shao Y. *et al.* Effects of Dietary Supplementation of Bovine Lactoferrin on Rumen Microbiota, Lactation, and Health in Dairy Goats. *Frontiers in Nutrition*. 2021; 8: 722303.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2021.722303>
110. El-Sharawy M.E. *et al.* Using lactoferrin and N-acetylcysteine to augment the growth rate and hemato-biochemical parameters of Egyptian Baladi goats kids. *Cogent Food & Agriculture*. 2024; 10(1): 2351041.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2351041>
111. Teraguchi S., Ozawa K., Yasuda S., Shin K., Fukuwatari Y., Shimamura S. The Bacteriostatic Effects of Orally Administered Bovine Lactoferrin on Intestinal *Enterobacteriaceae* of SPF Mice Fed Bovine Milk. *Bioscience Biotechnology, and Biochemistry*. 1994; 58(3): 482–487.
<https://doi.org/10.1271/bbb.58.482>
112. Robblee E.D. *et al.* Supplemental Lactoferrin Improves Health and Growth of Holstein Calves during the Prewaning Phase. *Journal of Dairy Science*. 2003; 86(4): 1458–1464.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73729-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73729-1)
113. Prenner M.L., Prgomet C., Sauerwein H., Pfaffl M.W., Broz J., Schwarz F.J. Effects of lactoferrin feeding on growth, feed intake and health of calves. *Archives of Animal Nutrition*. 2007; 61(1): 20–30.
<https://doi.org/10.1080/17450390600973675>
114. Wang Y.-Z., Shan T.-Z., Xu Z.-R., Feng J., Wang Z.-Q. Effects of the lactoferrin (LF) on the growth performance, intestinal microflora and morphology of weanling pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 2007; 135(3–4): 263–272.
<https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2006.07.013>
115. Ma X. *et al.* Effects of dietary supplementation of bovine lactoferrin on growth performance, immune function and intestinal health in weaning piglets. *BioMetals*. 2023; 36(3): 587–601.
<https://doi.org/10.1007/s10534-022-00461-x>
116. Jahan M. *et al.* Dietary lactoferrin supplementation to gilts during gestation and lactation improves pig production and immunity. *PLOS One*. 2017; 12(10): e0185817.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185817>
117. Shan T., Wang Y., Wang Y., Liu J., Xu Z. Effect of dietary lactoferrin on the immune functions and serum iron level of weanling piglets. *Journal of Animal Science*. 2018; 85(9): 2140–2146.
<https://doi.org/10.2527/jas.2006-754>
118. Sarkar V.K. *et al.* Early-Life Intervention of Lactoferrin and Probiotic in Suckling Piglets: Effects on Immunoglobulins, Intestinal Integrity, and Neonatal Mortality. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023; 15(1): 149–159.
<https://doi.org/10.1007/s12602-022-09964-y>
119. Dierick M., Ongena R., Vanrompay D., Devriendt B., Cox E. Exploring the modulatory role of bovine lactoferrin on the microbiome and the immune response in healthy and Shiga toxin-producing *E. coli* challenged weaned piglets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2024; 15: 39.
<https://doi.org/10.1186/s40104-023-00985-3>
120. Hu W., Zhao J., Wang J., Yu T., Wang J., Li N. Transgenic milk containing recombinant human lactoferrin modulates the intestinal flora in piglets. *Biochemistry and Cell Biology*. 2012; 90(3): 485–496.
<https://doi.org/10.1139/o2012-003>
121. Li Q. *et al.* Supplementation transgenic cow's milk containing recombinant human lactoferrin enhances systematic and intestinal immune responses in piglets. *Molecular Biology Reports*. 2014; 41(4): 2119–2128.
<https://doi.org/10.1007/s11033-014-3061-5>
122. Cooper C.A., Nelson K.M., Maga E.A., Murray J.D. Consumption of transgenic cows' milk containing human lactoferrin results in beneficial changes in the gastrointestinal tract and systemic health of young pigs. *Transgenic Research*. 2013; 22(3): 571–578.
<https://doi.org/10.1007/s11248-012-9662-7>
123. Badr H., Nabil N.M., Tawakol M.M. Effects of the prebiotic lactoferrin on multidrug-resistant *Escherichia coli* infections in broiler chickens. *Veterinary World*. 2021; 14(8): 2197–2205.
<https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.2197-2205>
106. Cowles K.E., White R.A., Whitehouse N.L., Erickson P.S. Growth Characteristics of Calves Fed an Intensified Milk Replacer Regimen with Additional Lactoferrin. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(12): 4835–4845.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72532-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72532-2)
107. Mallaki M., Hosseinkhani A., Taghizadeh A., Paya H., Hamidian Gh. Effect of Lactoferrin and Probiotic on Health Status and Reduction of *Escherichia Coli* Infection in Ghezel Lambs in Prewaning Phase. *Veterinary Research and Biological Products*. 2021; 34(1): 55–62.
<https://doi.org/10.22092/vj.2020.128115.1634>
108. El-Ashker M., Risha E., Abdelhamid F., Ateya A. Potential immune modulating properties and antioxidant activity of supplementing commercially available lactoferrin and/or *Lactobacillus* sp. in healthy Ossimi lambs. *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2018; 21(4): 705–713.
<https://doi.org/10.24425/124309>
109. Shao Y. *et al.* Effects of Dietary Supplementation of Bovine Lactoferrin on Rumen Microbiota, Lactation, and Health in Dairy Goats. *Frontiers in Nutrition*. 2021; 8: 722303.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2021.722303>
110. El-Sharawy M.E. *et al.* Using lactoferrin and N-acetylcysteine to augment the growth rate and hemato-biochemical parameters of Egyptian Baladi goats kids. *Cogent Food & Agriculture*. 2024; 10(1): 2351041.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2351041>
111. Teraguchi S., Ozawa K., Yasuda S., Shin K., Fukuwatari Y., Shimamura S. The Bacteriostatic Effects of Orally Administered Bovine Lactoferrin on Intestinal *Enterobacteriaceae* of SPF Mice Fed Bovine Milk. *Bioscience Biotechnology, and Biochemistry*. 1994; 58(3): 482–487.
<https://doi.org/10.1271/bbb.58.482>
112. Robblee E.D. *et al.* Supplemental Lactoferrin Improves Health and Growth of Holstein Calves during the Prewaning Phase. *Journal of Dairy Science*. 2003; 86(4): 1458–1464.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73729-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73729-1)
113. Prenner M.L., Prgomet C., Sauerwein H., Pfaffl M.W., Broz J., Schwarz F.J. Effects of lactoferrin feeding on growth, feed intake and health of calves. *Archives of Animal Nutrition*. 2007; 61(1): 20–30.
<https://doi.org/10.1080/17450390600973675>
114. Wang Y.-Z., Shan T.-Z., Xu Z.-R., Feng J., Wang Z.-Q. Effects of the lactoferrin (LF) on the growth performance, intestinal microflora and morphology of weanling pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 2007; 135(3–4): 263–272.
<https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2006.07.013>
115. Ma X. *et al.* Effects of dietary supplementation of bovine lactoferrin on growth performance, immune function and intestinal health in weaning piglets. *BioMetals*. 2023; 36(3): 587–601.
<https://doi.org/10.1007/s10534-022-00461-x>
116. Jahan M. *et al.* Dietary lactoferrin supplementation to gilts during gestation and lactation improves pig production and immunity. *PLOS One*. 2017; 12(10): e0185817.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185817>
117. Shan T., Wang Y., Wang Y., Liu J., Xu Z. Effect of dietary lactoferrin on the immune functions and serum iron level of weanling piglets. *Journal of Animal Science*. 2018; 85(9): 2140–2146.
<https://doi.org/10.2527/jas.2006-754>
118. Sarkar V.K. *et al.* Early-Life Intervention of Lactoferrin and Probiotic in Suckling Piglets: Effects on Immunoglobulins, Intestinal Integrity, and Neonatal Mortality. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023; 15(1): 149–159.
<https://doi.org/10.1007/s12602-022-09964-y>
119. Dierick M., Ongena R., Vanrompay D., Devriendt B., Cox E. Exploring the modulatory role of bovine lactoferrin on the microbiome and the immune response in healthy and Shiga toxin-producing *E. coli* challenged weaned piglets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2024; 15: 39.
<https://doi.org/10.1186/s40104-023-00985-3>
120. Hu W., Zhao J., Wang J., Yu T., Wang J., Li N. Transgenic milk containing recombinant human lactoferrin modulates the intestinal flora in piglets. *Biochemistry and Cell Biology*. 2012; 90(3): 485–496.
<https://doi.org/10.1139/o2012-003>
121. Li Q. *et al.* Supplementation transgenic cow's milk containing recombinant human lactoferrin enhances systematic and intestinal immune responses in piglets. *Molecular Biology Reports*. 2014; 41(4): 2119–2128.
<https://doi.org/10.1007/s11033-014-3061-5>
122. Cooper C.A., Nelson K.M., Maga E.A., Murray J.D. Consumption of transgenic cows' milk containing human lactoferrin results in beneficial changes in the gastrointestinal tract and systemic health of young pigs. *Transgenic Research*. 2013; 22(3): 571–578.
<https://doi.org/10.1007/s11248-012-9662-7>
123. Badr H., Nabil N.M., Tawakol M.M. Effects of the prebiotic lactoferrin on multidrug-resistant *Escherichia coli* infections in broiler chickens. *Veterinary World*. 2021; 14(8): 2197–2205.
<https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.2197-2205>

124. Rehman A., Behan A.A., Arain M.A., Zhou C. Iron-bearing lactoferrin a functional feed additive for poultry industry: a review on health benefits and nutritional advancement. *World's Poultry Science Journal*. 2024; 80(4): 1171–1188. <https://doi.org/10.1080/00439339.2024.2409453>
125. Geier M.S. *et al.* The effects of lactoferrin on the intestinal environment of broiler chickens. *British Poultry Science*. 2011; 52(5): 564–572. <https://doi.org/10.1080/00071668.2011.607429>
126. Hung C.-M. *et al.* Porcine lactoferrin administration enhances peripheral lymphocyte proliferation and assists infectious bursal disease vaccination in native chickens. *Vaccine*. 2010; 28(16): 2895–2902. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2010.01.066>
127. Chen H. *et al.* Bovine lactoferrin alleviates aflatoxin B1 induced hepatic and renal injury in broilers by mediating Nrf2 signaling pathway. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104316. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104316>
128. Chen H.-L. *et al.* Recombinant porcine lactoferrin expressed in the milk of transgenic mice protects neonatal mice from a lethal challenge with enterovirus type 71. *Vaccine*. 2008; 26(7): 891–898. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2007.12.013>
129. Dong H. *et al.* Effects of Lactoferrin and *Lactobacillus* Supplementation on Immune Function, Oxidative Stress, and Gut Microbiota in Kittens. *Animals*. 2024; 14(13): 1949. <https://doi.org/10.3390/ani14131949>
130. Han Z.-S. *et al.* High-level expression of human lactoferrin in the milk of goats by using replication-defective adenoviral vectors. *Protein Expression and Purification*. 2007; 53(1): 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2006.11.019>
131. Zhang J. *et al.* Expression of active recombinant human lactoferrin in the milk of transgenic goats. *Protein Expression and Purification*. 2008; 57(2): 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2007.10.015>
132. Yu H. *et al.* The dominant expression of functional human lactoferrin in transgenic cloned goats using a hybrid lactoferrin expression construct. *Journal of Biotechnology*. 2012; 161(3): 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.06.035>
133. Будевич А.И., Богданович Д.М., Пайтеров С.Н., Кирикович Ю.К. Криостойчивость эмбрионов коз-продуцентов биоаналога лактоферрина человека. *Научное обеспечение животноводства Сибири. Материалы V Международной научно-практической конференции*. Красноярск. 2021; 84–90. EDN XGCKCQ
134. Рудак А.Н., Герман Ю.И., Будевич А.И., Заремба Н.Л. Зоотехническая характеристика коз-продуцентов биоаналога лактоферрина человека. *Зоотехническая наука Беларуси*. 2020; 55(1): 171–178. EDN TSJQXX
135. Будевич А.И. и др. Оплодотворяющая способность спермы и трансмиссия чужеродной ДНК потомству от первичных по гену лактоферрина человека козлов-производителей. *Зоотехническая наука Беларуси*. 2010; 45(1): 22–28. EDN WIACHF
136. Орёл Н.М. Эффективность использования рекомбинантного лактоферрина для коррекции биохимических нарушений у крыс в моделях доксициклинового холестаза и аллоксанового диабета. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2017; (2): 72–79. EDN YRWYRN
137. Черноусов А.Д. и др. Неолактоферрин как стимулятор врожденного и адаптивного иммунитета. *Acta Naturae*. 2013; 5(4): 78–84. <https://doi.org/10.32607/20758251-2013-5-4-71-76>
138. Кобляков А.В., Антошина Е.Е., Горькова Т.Г., Гольдман И.Л., Труханова Л.С., Садчикова Е.Р. Тормозящее действие лактоферрина человека (неолактоферрина) на рост перевиваемой опухоли шейки матки мышей. *Вопросы онкологии*. 2012; 58(5): 668–673. EDN PDRFTP
139. Appel M.J. *et al.* Sub-chronic (13-week) oral toxicity study in rats with recombinant human lactoferrin produced in the milk of transgenic cows. *Food and Chemical Toxicology*. 2006; 44(7): 964–973. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.11.012>
140. Cooper C.A., Maga E.A., Murray J.D. Production of human lactoferrin and lysozyme in the milk of transgenic dairy animals: past, present, and future. *Transgenic Research*. 2015; 24(4): 605–614. <https://doi.org/10.1007/s11248-015-9885-5>
141. Wang M. *et al.* Large-scale production of recombinant human lactoferrin from high-expression, marker-free transgenic cloned cows. *Scientific Reports*. 2017; 7: 10733. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11462-z>
142. Будевич А.И., Петрушко Е.В., Ермолицкий В.Н., Пайтерова О.В., Сви́рская А.А. Влияние интервального доения коз-продуцентов на физико-химические показатели и содержание лактоферрина человека в молоке животных. *Ученые записки учреждения образования «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины»*. 2023; 59(2): 93–98. <https://doi.org/10.52368/2078-0109-2023-59-2-93-98>
124. Rehman A., Behan A.A., Arain M.A., Zhou C. Iron-bearing lactoferrin a functional feed additive for poultry industry: a review on health benefits and nutritional advancement. *World's Poultry Science Journal*. 2024; 80(4): 1171–1188. <https://doi.org/10.1080/00439339.2024.2409453>
125. Geier M.S. *et al.* The effects of lactoferrin on the intestinal environment of broiler chickens. *British Poultry Science*. 2011; 52(5): 564–572. <https://doi.org/10.1080/00071668.2011.607429>
126. Hung C.-M. *et al.* Porcine lactoferrin administration enhances peripheral lymphocyte proliferation and assists infectious bursal disease vaccination in native chickens. *Vaccine*. 2010; 28(16): 2895–2902. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2010.01.066>
127. Chen H. *et al.* Bovine lactoferrin alleviates aflatoxin B1 induced hepatic and renal injury in broilers by mediating Nrf2 signaling pathway. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104316. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104316>
128. Chen H.-L. *et al.* Recombinant porcine lactoferrin expressed in the milk of transgenic mice protects neonatal mice from a lethal challenge with enterovirus type 71. *Vaccine*. 2008; 26(7): 891–898. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2007.12.013>
129. Dong H. *et al.* Effects of Lactoferrin and *Lactobacillus* Supplementation on Immune Function, Oxidative Stress, and Gut Microbiota in Kittens. *Animals*. 2024; 14(13): 1949. <https://doi.org/10.3390/ani14131949>
130. Han Z.-S. *et al.* High-level expression of human lactoferrin in the milk of goats by using replication-defective adenoviral vectors. *Protein Expression and Purification*. 2007; 53(1): 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2006.11.019>
131. Zhang J. *et al.* Expression of active recombinant human lactoferrin in the milk of transgenic goats. *Protein Expression and Purification*. 2008; 57(2): 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2007.10.015>
132. Yu H. *et al.* The dominant expression of functional human lactoferrin in transgenic cloned goats using a hybrid lactoferrin expression construct. *Journal of Biotechnology*. 2012; 161(3): 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.06.035>
133. Budevich A.I., Bogdanovich D.M., Paitserau S.N., Kirykovich Yu.K. Cryostability of embryos of goat producers of human lactoferrin bioanalogue. *Scientific support for livestock breeding in Siberia. Proceedings of the V International scientific and practical conference*. Krasnoyarsk. 2021; 84–90 (in Russian). EDN XGCKCQ
134. Rudak A.N., Herman Yu.I., Budevich A.I., Zaremba N.L. Zootechnical characteristics of goats producing bioanalogue of human lactoferrin. *Zootechnical Science of Belarus*. 2020; 55(1): 171–178 (in Russian). EDN TSJQXX
135. Budevich A.I. *et al.* Fertilization ability of sperm and transmission of alien DNA to progeny from human lactoferrin gene primary goats-producers. *Zootechnical Science of Belarus*. 2010; 45(1): 22–28 (in Russian). EDN WIACHF
136. Oryol N.M. The effectiveness of the use of recombinant lactoferrin for correcting biochemical irregularities in rats with experimental doxycycline-induced cholestasis and alloxan model of diabetes. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2017; (2): 72–79 (in Russian). EDN YRWYRN
137. Chernousov A.D. *et al.* Neolactoferrin as a Stimulator of Innate and Adaptive Immunity. *Acta Naturae*. 2013; 5(4): 71–76. <https://doi.org/10.32607/20758251-2013-5-4-71-76>
138. Koblyakov A.V., Antoshina E.E., Gorkova T.G., Goldman I.L., Trukhanova L.S., Sadchikova E.R. Braking effect of human lactoferrin (neolactoferrin) on growth of transplantable tumor of the cervix in mice. *Problems in oncology*. 2012; 58(5): 668–673 (in Russian). EDN PDRFTP
139. Appel M.J. *et al.* Sub-chronic (13-week) oral toxicity study in rats with recombinant human lactoferrin produced in the milk of transgenic cows. *Food and Chemical Toxicology*. 2006; 44(7): 964–973. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.11.012>
140. Cooper C.A., Maga E.A., Murray J.D. Production of human lactoferrin and lysozyme in the milk of transgenic dairy animals: past, present, and future. *Transgenic Research*. 2015; 24(4): 605–614. <https://doi.org/10.1007/s11248-015-9885-5>
141. Wang M. *et al.* Large-scale production of recombinant human lactoferrin from high-expression, marker-free transgenic cloned cows. *Scientific Reports*. 2017; 7: 10733. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11462-z>
142. Budevich A.I., Petruschko E.V., Ermolitsky V.N., Payterova O.V., Svirskaya A.A. Influence of interval milking of producing goats on physicochemical indicators and content of human lactoferrin in animal milk. *Scientific notes of the educational institution «Vitebsk Order «Badge of Honor» State Academy of Veterinary Medicine»*. 2023; 59(2): 93–98 (in Russian). <https://doi.org/10.52368/2078-0109-2023-59-2-93-98>

143. Будевич А.И., Петрушко Е.В., Богданович Д.М., Кузнецова В.Н., Кирикович Ю.К. Влияние сезона года и лактации на состав молока коз-продуцентов биоаналога лактоферрина человека. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2021; (1): 81–91.
<https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-58-1-81-91>

144. Ochoa T.J. *et al.* Randomized controlled trial of lactoferrin for prevention of sepsis in peruvian neonates less than 2500 g. *The Pediatric Infectious Disease Journal*. 2015; 34(6): 571–576.
<https://doi.org/10.1097/INF.0000000000000593>

143. Budevich A.I., Petrushko E.V., Bogdanovich D.M., Kuznetsova V.N., Kirikovich I.K. Influence of the season and lactation on the milk composition of goats-producers of biosimilar human lactoferrin. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2021; (1): 81–91 (in Russian).
<https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-58-1-81-91>

144. Ochoa T.J. *et al.* Randomized controlled trial of lactoferrin for prevention of sepsis in peruvian neonates less than 2500 g. *The Pediatric Infectious Disease Journal*. 2015; 34(6): 571–576.
<https://doi.org/10.1097/INF.0000000000000593>

ОБ АВТОРАХ

Ярослав Максимович Ребезов¹

кандидат биологических наук, научный сотрудник сектора прикладной биотехнологии учебно-научной исследовательской лаборатории Химико-технологического института
 yaroslavreb@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1121-8139>

Максим Борисович Ребезов²

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник
 m.rebezov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Ульяна Юрьевна Медведева¹

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции Химико-технологического института
 medvedevau@rambler.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0253-4447>

¹Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия

²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Yaroslav Maksimovich Rebezov¹

Candidate of Biological Sciences, Researcher at the Applied Biotechnology Sector of the Educational and Scientific Research Laboratory of the Institute of Chemical Technology
 yaroslavreb@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1121-8139>

Maksim Borisovich Rebezov²

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher
 m.rebezov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Ulyana Yurievna Medvedeva¹

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Production and Processing of Agricultural Products at the Institute of Chemical Technology
 medvedevau@rambler.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0253-4447>

¹Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod, 173003, Russia

²Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin St., Moscow, 109316, 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.С. Горелик¹О.В. Горелик² ✉М.Б. Ребезов^{2,3}С.Ю. Харлап²Н.А. Эйриян²К.С. Исаева⁴Н.И. Кульмакова⁵

¹Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

³Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан

⁵Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия

✉ olgao205en@yandex.ru

Поступила в редакцию: 11.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.01.2026

Принята к публикации: 26.01.2026

© Горелик А.С., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю., Эйриян Н.А., Исаева К.С., Кульмакова Н.И.

Research article

 creative commons
Open access
Artem S. Gorelik¹Olga V. Gorelik² ✉Maksim B. Rebezov^{2,3}Svetlana Yu. Kharlap²Nikolay A. Eyriyan²Kuralay S. Isaeva⁴Natalia I. Kulmakova⁵

¹Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia

²Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

³Gorbatov Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

⁴Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

⁵Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russia

✉ olgao205en@yandex.ru

Received by the editorial office: 11.12.2025

Accepted in revised: 15.01.2026

Accepted for publication: 26.01.2026

© Gorelik A.S., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu., Eyriyan N.A., Isaeva K.S., Kulmakova N.I.

Оценка изменчивости молочных признаков коров в зависимости от лактационной деятельности

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Разведение голштинского скота выявило проблемы: снижение воспроизводительных функций и сокращение продуктивного долголетия. Это часто связывают как с нарушениями обмена веществ у коров из-за несбалансированности рационов, так и с высокой продуктивностью. Изучение возможности длительного продуктивного использования коров голштинской породы в регионе актуально для повышения эффективности молочного скотоводства. *Цель работы* — оценка изменчивости молочных признаков коров в зависимости от длительности лактационной деятельности.

Методы. Объект исследования — коровы, завершившие лактацию, распределённые по группам в зависимости от номера лактации. Использованы данные базы ИАС «СЕЛЭКС-Молочный скот» и собственных исследований. Изучена структура стада, установлен средний удой по лактациям. Продуктивность контролировали по контрольным дойкам. Рассчитан коэффициент вариации.

Результаты. Основная доля поголовья (44,8%) представлена коровами 1-й и 2-й лактаций. Продуктивность стабилизируется с 3-й по 6-ю лактацию. Разница между минимальным и максимальным удоем превышает 200%. Коэффициент вариации по удою (>10%) указывает на неоднородность стада, особенно среди коров 1-й и 8-й лактаций, что связано с массовым вводом ремонтных телок без отбора. Показатели МДЖ и МДБ стабильны, их коэффициенты вариации находятся в пределах нормы.

Коров голштинской породы возможно эффективно использовать до 6–7 лактации. Для повышения однородности стада необходимо оптимизировать отбор ремонтного молодняка.

Ключевые слова: Голштинская порода, коровы, возраст, лактация, продуктивность, удой, массовая доля жира (МДЖ) и белка (МДБ) в молоке, изменчивость.

Для цитирования: Горелик А.С. и др. Оценка изменчивости молочных признаков коров в зависимости от лактационной деятельности. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 60–67. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-60-67>

Evaluation of variability of dairy characteristics of cows depending on lactation activity

ABSTRACT

Relevance. The breeding of Holstein cattle has revealed problems: reduced reproductive function and shorter productive longevity, often associated with metabolic disorders due to poor diet balance and high productivity. Studying the possibility of long-term productive use of Holstein cows in the region is relevant for improving dairy farming efficiency. The aim was to evaluate the variability of dairy characteristics of cows depending on lactation duration.

Methods. The study object was cows that completed lactation, grouped by lactation number. Data from the IAC “SELEX-Dairy Cattle” database and own research were used. Herd structure was studied, average milk yield per lactation was established. Productivity was monitored via control milkings. The coefficient of variation was calculated.

Results. The main part of the herd (44.8%) consists of 1st and 2nd lactation cows. Productivity stabilizes from the 3rd to the 6th lactation. The difference between minimum and maximum milk yield exceeds 200%. The coefficient of variation for milk yield (>10%) indicates herd heterogeneity, especially among 1st and 8th lactation cows, due to the mass introduction of replacement heifers without selection. Fat and protein content indicators are stable, their coefficients of variation are within normal limits.

Holstein cows can be effectively used up to the 6th–7th lactation. To improve herd uniformity, it is necessary to optimize the selection of replacement young stock.

Key words: Holstein breed, cows, age, lactation, productivity, milk yield, mass fraction of fat and protein in milk, variability.

For citation: Gorelik A.S. *et al.* Evaluation of variability of dairy characteristics of cows depending on lactation activity. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 60–67 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-60-67>

Введение/Introduction

Развитие агропромышленного комплекса страны является стратегической задачей для обеспечения устойчивости продовольственной безопасности страны, особенно в условиях санкционного сдерживания международных отношений [1]. Обеспечение продовольственной безопасности и технологического суверенитета Российской Федерации¹ является стратегической задачей агропромышленного комплекса, решение которой базируется на внедрении отечественных инновационных разработок во всех звеньях производственной цепи², включая вопросы обеспечения качества и безопасности продукции [2, 3]. Ключевым вектором развития сельскохозяйственных организаций и предприятий по переработки сельскохозяйственной продукции различных форм собственности выступает переход к наукоемкому производству, основанному на внедрении российских цифровых, био- и генотехнологий [1], что обеспечивает устойчивый рост объемов и качества продукции для внутреннего рынка.

Особое внимание уделяется молочному скотоводству, так как от крупного рогатого скота получают ценные продукты питания молоко и говядину, которые обеспечивают потребности населения в необходимых и незаменимых питательных веществах, при этом молочный белок является самым дешевым, поскольку для его производства используется дешевый растительный корм [1, 8–10]. Молоко получают от маточного поголовья крупного рогатого скота, большее количество которого представлено самой обильномолочной в мире породой — голштинской [11–13]. В Российской Федерации голштинская порода получила распространение, как за счет завоза чистопородных животных из-за рубежа для создания племенных стад и разведения «в себе», так и путем широкомасштабного и длительного поглотительного скрещивания массива отечественного молочного скота быками-производителями голштинской породы различной генерации [11–14]. В результате этого получены массивы животных с высоким генетическим потенциалом продуктивности, хорошо приспособленных к использованию в условиях промышленного производства молока в разных регионах страны, которые отличаются особенностями, связанными с природно-климатическими и породными ресурсами зоны разведения [15–19].

В зоне Среднего Урала в качестве улучшаемой породы выступала черно-пестрая порода уральского отродья. На маточном поголовье

использовались быки голштинской породы из Дании, Германии, Канады и США. Современный молочный скот Среднего Урала относится к голштинской породе [20–24].

Разведение голштинского скота выявило проблемы: снижение воспроизводительных функций, сокращение продуктивного долголетия, что часто связывают как с нарушениями обмена веществ у коров из-за плохой сбалансированности рационов по питательным веществам, в том числе витаминам и макро-, микроэлементам, так и высокой продуктивностью. В Свердловской области, одновременно с повышением продуктивности коров, в большинстве сельскохозяйственных организаций средний срок хозяйственного использования составляет 2,4–2,6 лактации и продолжает снижаться. С одной стороны, наблюдается повышение удоев и увеличение количества производимого для продажи молока, с другой — увеличение затрат на ввод в стадо новых коров. Вызывает интерес возможность длительного использования коров голштинской породы при промышленном производстве молока. [10, 25–29].

Изучение вопросов возможности длительного продуктивного использования коров новой для региона голштинской породы актуально и имеет практическое значение с точки зрения повышения эффективности молочного скотоводства [28].

Целью работы явилась оценка изменчивости молочных признаков коров в зависимости от длительности лактационной деятельности.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводились в одном из типичных для Свердловской области племенных репродукторов по разведению голштинской породы.

Объектом исследований явились коровы, завершившие лактацию по состоянию на 30.10.2023 г.

Они были распределены на группы в зависимости от законченной лактации. Все животные содержались при оптимальных условиях кормления и содержания в соответствии с зоотехническими и зооигиеническими требованиями³.

Схемы кормления и кормовые рационы составлялись на основе кормов собственного производства с учетом норм кормления.

Материалом и данными для сравнения служила Информационно-аналитическая система «СЕЛЭКС — Молочный скот. Племенной учет в хозяйствах»⁴ (Россия), результаты собственных исследований.

¹ Доктрина продовольственной безопасности РФ: утверждена Указом Президента РФ от 21.01.2020 № 20. Последние существенные правки внесены 10 марта 2025 года (Указ № 141), которые расширили перечень показателей самообеспеченности и критериев качества продукции.

Стратегия национальной безопасности РФ: (Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400), где продовольственная безопасность закреплена как один из национальных приоритетов.

Стратегия научно-технологического развития РФ: (Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145), определяющая вектор на создание собственных критических технологий в АПК

² Контроль качества молока и молочных продуктов / Б. К. Асенова, М. Б. Ребезов, Г. М. Топурия [и др.]. Алматы, 2013. — 212 с. — ISBN 978-601-7346-81-2. — EDN SMBSSR.

³ Морозова Н.И. и др. Молочная продуктивность голштинских коров при круглогодичном стойловом содержании (монография). Рязань, 2013.

⁴ ИАС «СЕЛЭКС» — Молочный скот. Племенной учет в хозяйствах внесена в Единый реестр российского программного обеспечения.

Реестровая запись № 1927 от 23.09.2016

Учитывались: удой за 305 дней лактации⁵, массовая доля жира (МДЖ) и белка (МДБ) в молоке.

Отбор проб сырья и продукции проводили в соответствии с ГОСТ 3622⁶, ГОСТ 26809.1⁷. Молочную продуктивность (удой, содержание жира, белка в молоке) коров контролировали по контрольным дойкам. Содержание жира и белка определяли в средней пробе молока от каждой коровы один раз в месяц^{8,9}.

Рассчитывали коэффициент вариации молочных признаков по лактациям.

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, использующихся для научных целей¹⁰, и принципов обращения с животными согласно статье 4 ФЗ РФ № 498-ФЗ¹¹.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

По состоянию на 30.10.2024 г., в хозяйстве завершили лактацию 447 коров, которые были распределены на группы в зависимости от номера законченной лактации.

Структура стада по возрасту в лактациях представлена на рисунке 1.

На диаграмме хорошо видно, что основное количество молочного поголовья в стаде на 44,8% представлено молодыми животными по первой и второй лактациям. Остальные распределены по половозрелым лактациям начиная с третьей и до 9 лактации со снижением количества голов до 33 и менее, начиная с 5 лактации. В связи с тем, что в обработку вошли не все коровы, а лишь закончившие лактацию, то структура всего стада несколько отличается от представленной на диаграмме. Исходя из абсолютных цифр поголовья молочного стада, а именно дойных коров молодых животных по 1 и 2 лактациям 61,3% и только 38,3% относятся к половозрелым коровам. Объясняется такое несоответствие тем, что длительность лактации у коров, особенно вводимых в стадо, превышает физиологические нормы, обеспечивающие технологический цикл производства молока.

На рисунке 2 представлена динамика изменения удоев в зависимости от возраста в лактациях.

По данным, представленным на диаграмме видно, что по средним удоям за ту или иную лактацию животные стада достаточно однотипные. У первотелок отмечается более низкие показатели удою, что соответствует лактационной

Рис. 1. Возрастная структура стада, гол./%

Fig. 1. Age structure of the herd, head/%

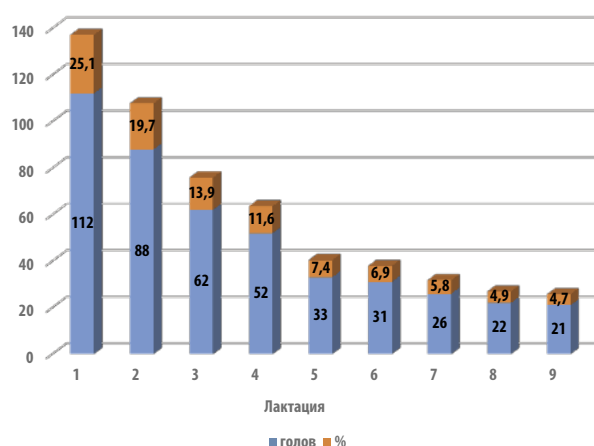
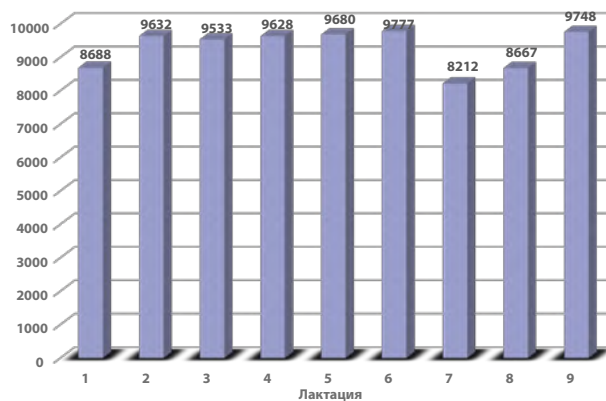


Рис. 2. Динамика удою в зависимости от возраста в лактациях, кг

Fig. 2. Milk yield dynamics depending on age in lactation, kg



деятельности в зависимости от возраста коров. Необходимо отметить, что достаточно часто у голштинского скота встречается увеличение удою по второй лактации относительно первой на более высокую разницу и некоторое снижение его по третьей относительно второй. По нашему мнению, это является породной особенностью животных, поскольку при выведении данной породы основным параметром по его совершенствованию был удой. Известно, что до недавнего времени в местностях создания данной породы не учитывали такие показатели как жирномолочность и некоторые другие показатели. Сама технология ведения молочного скотоводства в данных местностях отличается от отечественной в связи с разным подходом по получению продукции скотоводства — молока и говядины. Увеличение удою по второй лактации позволяет более интенсивно использовать маточное поголовье с учетом зарубежной технологии производства молока. 2-х циклическое

⁵ ГОСТ Р 51451-99 Методика учета надоев коровьего молока

⁶ ГОСТ 3622-68 Молоко и молочные продукты. Отбор проб и подготовка их к испытанию.

⁷ 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.

⁸ ГОСТ 5867-2023 Молоко и продукты переработки молока. Методы определения жира

⁹ ГОСТ 34454-2018 Продукция молочная. Определение массовой доли белка методом Кельдаля

¹⁰ 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

¹¹ 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»

интенсивное молокообразование во взаимосвязи с удлинением лактации позволяет говорить о полноценной окупаемости затрат на выращивание и содержание животного, которое в дальнейшем выбывает из стада. Однако при создании благоприятных условий содержания и кормления, хорошем здоровье, высокой стрессоустойчивости организма возможно и дальнейшее использование с целью получения молока. Это подтверждается и данными, представленными на рисунке. Установлено, что после 3-ей лактации идет стабилизация удоя до 6 лактации, то есть практически можно использовать коров до 6–7 лактации. Даже дальнейшее достаточно резкое снижение удоя на 1565 кг или на 16,0% не может служить основанием для их выбраковки в связи с низкой продуктивностью и в случае если эти коровы сохраняют высокую воспроизводительную функцию они могут и далее использоваться в стаде. Высокие показатели удоя по 9-ой лактации объясняются тем, что остаются самые устойчивые животные.

Эффективная племенная работа возможна при определенных условиях, в том числе и при разнообразии того или иного признака, по которому идет работа в сторону его улучшения. При этом не следует забывать и о том, что она будет иметь положительные результаты, когда его разнообразие не превышает определенных параметров.

Нами был проведен анализ изменчивости молочных признаков по параметрам максимального и минимального значения. На рисунке 3 представлены данные по удою.

Из представленных данных видно, что разница между минимальным и максимальным удоем превышает 200%. Следует отметить, что минимальные показатели по удою превышают минимальные требования по голштинской породе и в связи с этим данные коровы могут считаться племенными животными. Поскольку максимальный удой в какой-то мере может служить показателем генетического потенциала продуктивности коров стаде, это позволяет сделать вывод о возможности повышения продуктивности в хозяйстве при проведении планомерной селекционно-племенной работы. Установленные низкие показатели минимальных значений говорят о возможности повышения эффективности племенной работы за короткое время, за счет проведения выбраковки низкопродуктивного скота. Однако это возможно при введении в стадо дополнительного количества ремонтного молодняка, полученного в результате направленного интенсивного выращивания.

Данные о разнице в минимальном и максимальном удое по лактациям представлены на рисунке 4.

Как видно из данных на рисунке с возрастом коров разница между минимальными и максимальными показателями снижается, что связано со снижением количества животных в выборке по той или иной лактации и уходом из стада коров

Рис. 3. Разнообразие удоя у коров по лактациям, кг

Fig. 3. Milk yield diversity in cows by lactation, kg

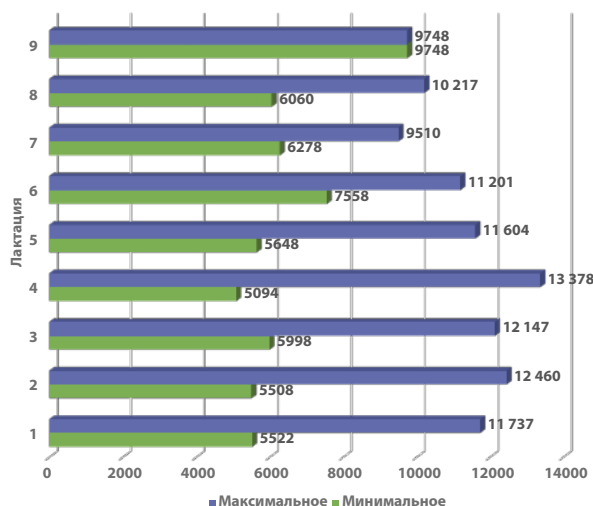
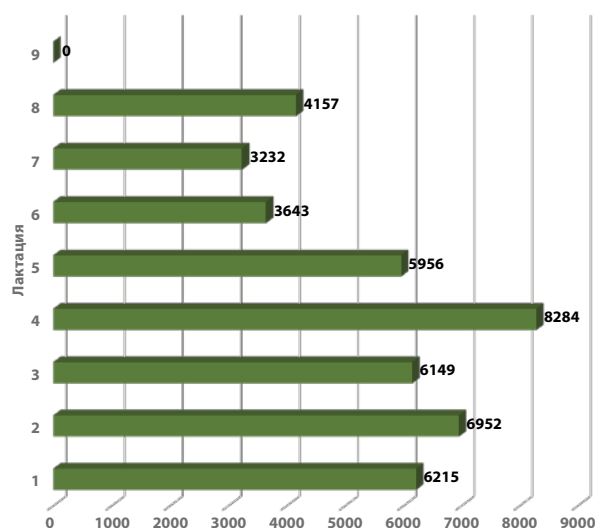


Рис. 4. Разница удоя в зависимости от лактации, кг

Fig. 4. Milk yield difference depending on lactation, kg



с низкими показателями продуктивности. Это позволяет говорить не только о повышении однородности стада по молочной продуктивности, но и позволяет более рационально организовывать технологические процессы, в том числе кормление коров по физиологическим группам.

Подобный анализ был проведен и по изменению качественных показателей молока. Установлено, что по содержанию жира в молоке по лактациям установлены существенные различия между минимальными и максимальными показателями практически по всем лактациям, что определяется в том числе и наследственными факторами — подбором быков-производителей к маточному поголовью с учетом молочных признаков. Меньшие различия между минимумом и максимумом были по массовой доле белка в молоке, что объясняется в том числе и тем, что данный показатель более стабилен и в меньшей степени изменяется под влиянием различных факторов, чем МДЖ в молоке (рис. 5).

На рисунке хорошо видно, что соотношения между минимальными и максимальными показателями МДЖ и МДБ в молоке достаточно постоянны и по МДЖ значительные, с колебаниями до 1,5%, по МДЖ в среднем — 0,4%.

Разница между ними по лактациям представлена на рисунке 6.

На диаграмме видно, что более стабильными в том числе по разнице между минимальными и максимальными показателями оказались значения массовой доли белка в молоке, а более значимые — по разнице между минимальным и максимальным показателем — по массовой доле жира в молоке. Кроме того, на основании полученных результатов можно сделать и вывод о том, что в стаде имеются животные, не достигающие минимальных требований по МДЖ в молоке и МДБ в молоке по голштинской породе, что позволяет рекомендовать хозяйству направить племенную работу на повышение качественных показателей в молоке.

О разнообразии того или иного признака можно судить и по коэффициенту вариации (изменчивости, C_v). По нему можно судить о степени однородности признаков совокупности. Чем больше его величина, тем больше разброс значений признаков вокруг средней, тем менее однородна совокупность по своему составу и тем менее представительна средняя. При показателе рассеивания данных до 10% говорят о незначительном отклонении, что приравнивается к норме, от 10 до 20 % — средний показатель, который предупреждает о назревающих проблемах. От 20 до 33% считается значительным, но допустимым, а при увеличении расхождения более 33% — вариация недопустима и требует пересмотра работы всех структурных подразделений.

В нашем случае коэффициент вариации показывает, что разброс показателей по массовой доле жира и массовой доле белка в молоке находится в нормальном соотношении (рис. 7).

Коэффициент вариации по удою превышает оптимальный показатель в 10%, что позволяет говорить о назревающих проблемах в молочном стаде. Это касается прежде всего показателей удоя у коров по первой и восьмой лактациям, что скорее всего связано с вводом в стадо практически всех ремонтных телок без дополнительного отбора из-за нехватки их количества. Увеличение данного показателя по 8-ой лактации связано в том числе и с тем, что данные животные имеют хорошие здоровье, воспроизводительные функции и устойчивые показатели естественной резистентности организма. Коэффициенты изменчивости по качественным показателям молока — МДЖ и МДБ

в молоке находились в оптимальных значениях с разницей по лактациям по содержанию жира от 4,10 до 8,26% и содержанию белка от 2,68 до 4,02%. Такие значения позволяют проводить отбор и сохранять равновесие по данным признакам в стаде.

Рис. 5. Минимальные и максимальные показатели МДЖ и МДБ в молоке по лактациям, %

Fig. 5. Minimum and maximum values of mass fraction of fat and protein in milk by lactation, %

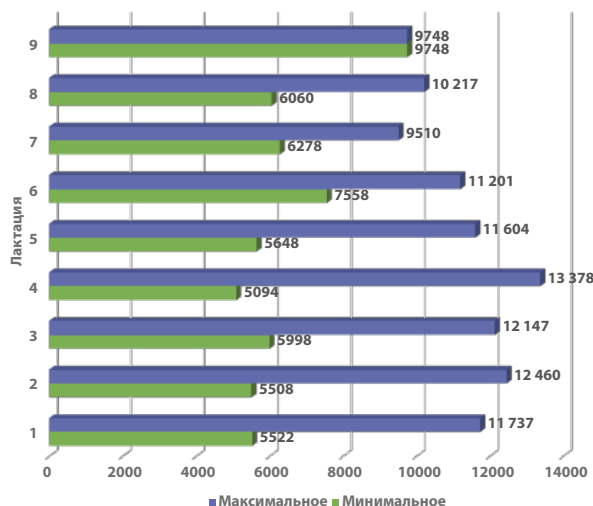


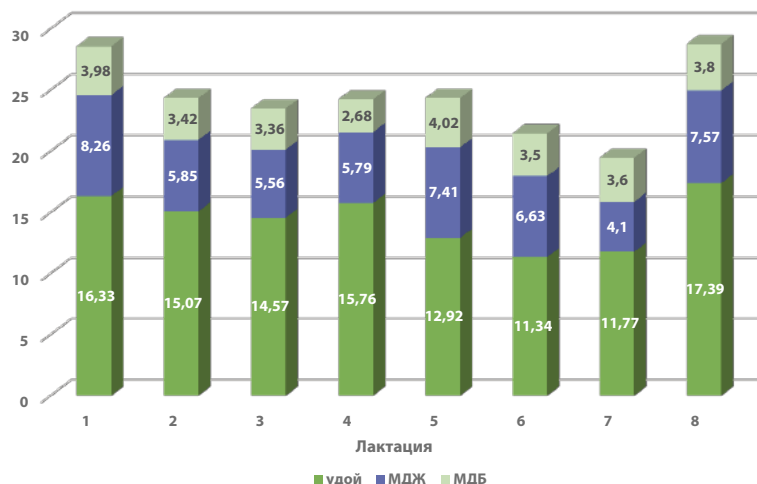
Рис. 6. Разница между минимальными и максимальными показателями МДЖ и МДБ в молоке по лактациям, %

Fig. 6. The difference between the minimum and maximum values of MJ and MDB in milk by lactation, %



Рис. 7. Коэффициент вариации молочных признаков по лактациям, %

Fig. 7. Coefficient of variation of milk characteristics by lactation, %



В целом полученный в результате расчетов коэффициент вариации подтверждает ранее сделанные выводы о закономерностях и особенностях изменения молочных признаков в зависимости от возраста в лактациях.

Выводы/Conclusions

Установлено, что в исследуемом стаде голштинских коров основная доля поголовья (44,8%) представлена животными первой и второй лактаций, что свидетельствует о высокой интенсивности ротации маточного состава.

Молочная продуктивность стабилизируется с 3-й по 6-ю лактацию, что подтверждает возможность длительного продуктивного использования коров голштинской породы до 6–7 лактации без существенного снижения экономической эффективности.

Высокий коэффициент вариации по удою (более 10%) указывает на значительную неоднородность стада по данному признаку, что обусловлено, в первую очередь, массовым вводом ремонтных телок без предварительного отбора.

Показатели массовой доли жира и белка в молоке демонстрируют стабильность и соответствуют нормативным значениям, что подтверждается низкими коэффициентами вариации (4,10–8,26% для жира и 2,68–4,02% для белка).

Результаты исследования позволяют рекомендовать хозяйствам оптимизировать систему отбора ремонтного молодняка, усилить селекционную работу по повышению однородности стада и продлить срок продуктивного использования коров до 6–7 лактации при сохранении их воспроизводительной функции.

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что в хозяйстве используется высокопродуктивный молочный скот голштинской породы. Коровы голштинского скота способны показывать высокую продуктивность длительное время. Наиболее стабильные показатели по удою у коров в возрасте со 2-ой по 6-ую лактацию включительно. Следует отметить и то, что и далее можно использовать животных для получения молока, которые и по 7–9 лактациям показывают высокие показатели молочной продуктивности.

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 является поисковым и выполнено в рамках научных исследований Уральского государственного аграрного университета номер государственной регистрации АААА-А19-1191014000069.

FUNDING:

The research is exploratory and was carried out within the framework of scientific research of the Ural State Agrarian University state registration number АААА-А19-1191014000069.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строев В.В., Магомедов М.Д., Алексейчева Е.Ю. Повышение производства и потребления молочных продуктов в России и продовольственная безопасность. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2023; 13(6–1): 368–380. <https://doi.org/10.34670/AR.2023.70.69.043>
2. Губер Н.Б., Ребезов М.Б., Максимюк Н.Н. Опыт прохождения аудитов в системе менеджмента безопасности пищевых продуктов. *Экономика сельского хозяйства России*. 2018; 9: 15–21. EDN XZJBUT.
3. Горелик О.В., Ребезов М.Б., Неверова О.П., Харлап С.Ю., Федосеева Н.А. Особенности производства сыра «Адыгейский» и его качество. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*. 2020; 1(1): 142–148. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-142-148>.
4. Блинов А.В., Самоволов А.В., Кастарнова Е.С., Назаретова Е.Д., Рехман З.А., Ребезов М.Б. Никотинатоаскорбат железа: синтез, токсичность, перспективы применения. *Аграрная наука*. 2025; 392(03): 137–143. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-137-143>
5. Зинина О.В., Вишнякова Е.А., Ребезов М.Б. Влияние биоактивной пленки на хранимоспособность хлеба. *Аграрная наука*. 2024; 385(8): 182–187. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-182-187>
6. Неверова О.П. и др. Оценка эффективности инкапсуляции бифидобактерий при обогащении пробиотиками сокоосодержащих напитков. *Пищевые системы*. 2024; 7(4): 598–604. <https://doi.org/10.21323/26189771-2024-7-4-598-604>
7. Блинов А.В., Рехман З.А., Самоволов А.В., Голик А.Б., Аванесян С.С., Ребезов М.Б. Исследование антиоксидантной активности кисломолочных продуктов, обогащенных селеномодержащей наноразмерной системой. *Аграрная наука*. 2025; 398(09): 151–157. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-151-157>
8. Гриценко С.А., Костомаров Н.М. Динамика показателей выращивания ремонтных телок в условиях животноводческого предприятия. *Главный зоотехник*. 2023; 11(244): 3–9. <https://doi.org/10.33920/sel-03-2311-01>

REFERENCES

1. Stroeve V.V., Magomedov M.D., Alekseycheva E.Yu. Increasing production and consumption of dairy products in Russia and food security. *Economics: yesterday, today, tomorrow*. 2023; 13(6–1): 368–380 (in Russian). <https://doi.org/10.34670/AR.2023.70.69.043>
2. Guber N.B., Rebezov M.B., Maksimiyuk N.N. Experience of passing audits in the food safety management system. *Agricultural Economics of Russia*. 2018; 9: 15–21 (in Russian). EDN XZJBUT.
3. Gorelik O.V., Rebezov M.B., Neverova O.P., Kharlap S.Yu., Fedoseeva N.A. Features of the production of Adygei cheese and its quality. *Current issues in the dairy industry, intersectoral technologies and quality management systems*. 2020; 1(1): 142–148 (in Russian). <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-142-148>.
4. Blinov A.V., Samovolov A.V., Kastarnova E.S., Nazaretova E.D., Rekhman Z.A., Rebezov M.B. Iron nicotinatoascorbate: synthesis, toxicity, application prospects. *Agrarian science*. 2025; 392(03): 137–143 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-137-143>
5. Zinina O.V., Vishnyakova E.A., Rebezov M.B. The effect of bioactive film on the shelf life of bread. *Agrarian science*. 2024; 385(8): 182–187 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-182-187>
6. Neverova O.P. et al. Effectiveness assessment of the bifidobacteria encapsulation when enriching juice-containing beverages with probiotics. *Food Systems*. 2024; 7(4): 598–604. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-598-604>
7. Blinov A.V., Rekhman Z.A., Samovolov A.V., Golik A.B., Avanesyan S.S., Rebezov M.B. Study of antioxidant activity of fermented milk products enriched with selenium-containing nanosized system. *Agrarian science*. 2025; 398(09): 151–157 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-151-157>
8. Gritsenko S.A., Kostomakhin N.M. Dynamics of indicators of growing replacement heifers in a livestock enterprise. *Head of Animal Breeding*. 2023; 11(244): 3–9 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/sel-03-2311-01>

9. Артемов Е.С., Сtribunova A.A., Svetlichnaya A.Yu. Скотоводство России - современные аспекты и перспективы. *Технологии и экспертиза сельскохозяйственной продукции*. 2025; 2(29): 63–74. https://doi.org/10.53914/issn3034-6940_2025_2_63
10. Liang Z., Prakapenka D., Zaabza H.B., VanRaden P.M., Van Tassell C.P., Da Y. A million-cow genome-wide association study of productive life in U.S. Holstein cows. *Genetics Selection Evolution*. 2024; 56: 67. <https://doi.org/10.1186/s12711-024-00935-1>
11. Шелковкина Е.В., Горелик О.В. Хозяйственно-полезные качества голштинизированного черно-пестрого скота. *Молодежь и наука*. 2021; 11. EDN DSUOXU
12. Колесникова А.В., Басонов О.А. Степень использования генетического потенциала голштинских быков-производителей различной селекции. *Зоотехния*. 2017; (1): 10–12. EDN XWVGCV
13. Сельцов В.И., Молчанова Н.В., Сулима Н.Н. Влияние методов разведения на продуктивное долголетие и пожизненную продуктивность коров. *Зоотехния*. 2013; (9): 2–4. EDN RCLXIN
14. Сермягин А.А., Быкова О.А., Лоретц О.Г., Костюнина О.В., Зиновьева Н.А. Оценка геномной изменчивости продуктивных признаков у животных голштинизированной черно-пестрой породы на основе анализа GWAS и паттернов ROH. *Сельскохозяйственная биология*. 2020; 55(2): 257–274. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.2.257rus>
15. Чеченихина О.С., Смирнова Е.С. Биологические и продуктивные особенности коров черно-пестрой породы при различной технологии доения. *Молочнохозяйственный вестник*. 2020; 1 (37): 90–102. EDN UEOGV
16. Дунин И.М. Тяпугин С.Е., Мещеряков Р.К. Разведение скота голштинской породы на территории Российской Федерации. *Зоотехния*. 2020. (2): 5–8. <https://doi.org/10.25708/ZT.2020.95.35.002>
17. Сафронов С.Л., Костомакхин Н.М., Соловьева О.И., Остроухова В.И., Кулмакова Н.И. Молочная продуктивность и долголетие коров в условиях промышленной технологии производства молока. *Селекционные и технологические аспекты интенсификации производства продуктов животноводства. По материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 150-летию со дня рождения академика М.Ф. Иванова*. 2022; 223–227. EDN DRQJGH
18. Соловьева О.И., Крестянинова Е.И., Халикова Т.Ю. Продуктивность и воспроизводительные качества коров голштинской породы разного происхождения. *Главный зоотехник*. 2020; (12): 24–33. <https://doi.org/10.33920/sel-03-2012-03>
19. Павлова Т.В., Новик С.Н. Продолжительность хозяйственного использования и молочная продуктивность коров разных генотипов в СПК «Ляховичский». *Животноводство и ветеринарная медицина*. 2017; 2: 31–37. EDN YMNEAU
20. Чеченихина О.С., Быкова О.А., Лоретц О.Г., Степанов А.В. Возраст выбытия коров из стада в зависимости от генетических и паратипических факторов. *Аграрный вестник Урала*. 2021; (6): 71–79. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-209-06-71-79>
21. Гридин В.Ф., Грдина С.Л. Анализ породного и классного состава крупного рогатого скота уральского региона. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019; (1): 50–51. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019150-51>
22. Лоретц О.Г., Горелик О.В., Гафнер В.Д. Влияние происхождения на молочную продуктивность коров. *Аграрный вестник Урала*. 2016; 4(146): 45–50. EDN VWUUGZ
23. Шелковкина Е.В., Харлап С.Ю., Горелик О.В. Молочная продуктивность голштинизированного черно-пестрого скота. *Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. Том Часть I. С.-Пб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет*, 2022; 321–324. EDN RQADJU
24. Gorelik O.V., Lihodeevskaya O.E., Zezin N.N., Sevostyanov M.Ya., Leshonok O.I. The use of inbreeding in dairy cattle breeding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 2020. Vol. 548. Volgograd, 2020. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited*, 2020; 82013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082013>
25. Назарченко О.В., Цопанова А.В., Денисов С.А., Евшиков С.С. Голштинская порода и ее генетический потенциал в условиях Зауралья. *Аграрная наука в условиях модернизации и цифрового развития АПК России. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции. Курган (Лесниково): Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева* 2022; 139–143. EDN RWWKJV

9. Artemov E.S., Stribunova A.A., Svetlichnaya A.Yu. Cattle breeding in Russia - current aspects and prospects. *Technologies and examination of agricultural products*. 2025; 2(29): 63–74 (in Russian). https://doi.org/10.53914/issn3034-6940_2025_2_63
10. Liang Z., Prakapenka D., Zaabza H.B., VanRaden P.M., Van Tassell C.P., Da Y. A million-cow genome-wide association study of productive life in U.S. Holstein cows. *Genetics Selection Evolution*. 2024; 56: 67. <https://doi.org/10.1186/s12711-024-00935-1>
11. Shelkovkina E.V., Gorelik O.V. Economically useful qualities of Holsteinized black-and-white cattle. *Youth and Science*. 2021; 11 (in Russian). EDN DSUOXU
12. Kolesnikova A.V., Basonov O.A. The degree of use of the genetic potential of Holstein sires of various selections. *Zootchnics*. 2017; (1): 10–12 (in Russian). EDN XWVGCV
13. Seltsov V.I., Molchanova N.V., Sulima N.N. The influence of breeding methods on the productive longevity and lifetime productivity of cows. *Zootchnics*. 2013; (9): 2–4 (in Russian). EDN RCLXIN
14. Sermyagin A.A., Bykova O.A., Lorets O.G., Kostyunina O.V., Zinovieva N.A. Assessment of genomic variability of productive traits in Holsteinized Black-and-White cattle based on GWAS analysis and ROH patterns. *Agricultural biology*. 2020; 55(2): 257–274 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.2.257rus>
15. Chechenikhina O.S., Smirnova E.S. Biological and productive characteristics of black-and-white cows with different milking technologies. *Dairy Bulletin*. 2020; 1 (37): 90–102 (in Russian). EDN UEOGV
16. Dunin I.M. Tyapugin S.E., Meshcheryakov R.K. Breeding Holstein cattle on the territory of the Russian Federation. *Animal science*. 2020; (2): 5–8 (in Russian). <https://doi.org/10.25708/ZT.2020.95.35.002>
17. Safronov S.L., Kostomakhin N.M., Solovieva O.I., Ostroukhova V.I., Kulmakova N.I. Milk productivity and longevity of cows under industrial milk production technology. *Breeding and technological aspects of intensification of livestock production. Based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician M.F. Ivanov*. 2022; 223–227 (in Russian). EDN DRQJGH
18. Solovyova O.I., Krestyaninova E.I., Khalikova T.Yu. Productivity and reproductive traits of cows of Holstein breed of different origin. *Head of animal breeding*. 2020; (12): 24–33 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/sel-03-2012-03>
19. Pavlova T.V., Novik S.N. Duration of economic use and milk productivity of cows of different genotypes in the Lyakhovichsky agricultural cooperative. *Animal Husbandry and Veterinary Medicine*. 2017; 2: 31–37 (in Russian). EDN YMNEAU
20. Chechenikhina O.S., Bykova O.A., Lorets O.G., Stepanov A.V. The age at which cows leave the herd depending on genetic and paratypic factors. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; (6): 71–79 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-209-06-71-79>
21. Gridin V.F., Gridina S.L. Analysis of the breed and class composition of cattle in the Ural region. *Russian agricultural science*. 2019; (1): 50–51 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019150-51>
22. Lorets O.G., Gorelik O.V., Gafner V.D. Influence of origin on milk productivity of cows. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2016; 4(146): 45–50 (in Russian). EDN VWUUGZ
23. Shelkovkina E.V., Kharlap S.Yu., Gorelik O.V. Milk productivity of Holsteinized Black-and-White cattle. *Intellectual potential of young scientists as a driver of agro-industrial complex development: Proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists and students. Volume Part I. St. Petersburg: St. Petersburg State Agrarian University*, 2022; 321–324 (in Russian). EDN RQADJU
24. Gorelik O.V., Lihodeevskaya O.E., Zezin N.N., Sevostyanov M.Ya., Leshonok O.I. The use of inbreeding in dairy cattle breeding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 2020. Vol. 548. Volgograd, 2020. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited*, 2020; 82013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082013>
25. Nazarchenko O.V., Tsopanova A.V., Denisov S.A., Evshikov S.S. Holstein breed and its genetic potential in the Trans-Urals. *Agricultural science in the context of modernization and digital development of the Russian agro-industrial complex. Collection of articles based on the materials of the International scientific and practical conference. Kurgan (Lesnikovo): Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev* 2022; 139–143 (in Russian). EDN RWWKJV

26. Гридина С.Л., Gridin V.F., Sidorova D.V., Novitskaya K.V. Сравнительный уровень голштинизации на молочную продуктивность коров черно-пестрой породы. *Достижения науки и техники АПК*. 2018; 32(8): 60–61. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10816>
27. Осипова В.И., Кровикова А.Н. Зависимость репродуктивных качеств коров голштинской породы от уровня их молочной продуктивности. *Современное состояние животноводства и тенденции его развития: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции*, Москва, 2025. М.: Академия Принт, 2025; 121–124. EDN OTZJHI
28. Zhang H. *et al.* Estimation of Genetic Parameters for Milk Production Rate and Its Stability in Holstein Population. *Animals*. 2024; 14(19): 2761. <https://doi.org/10.3390/ani14192761>
29. Miglior F., Fleming A., Malchiodi F., Brito L.F., Martin P., Baes C.F. A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(12): 10251–10271. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12968>

ОБ АВТОРАХ:

Артём Сергеевич Горелик¹

кандидат биологических наук
temae077ex@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3362-2514>

Ольга Васильевна Горелик²

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов
olgao205en@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9546-2069>

Максим Борисович Ребезов^{2,3}

- доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник²;
- доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов³

rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Светлана Юрьевна Харлап²

кандидат биологических наук, доцент
proffuniver@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3651-8835>

Николай Арменакович Эйриян²

кандидат экономических наук
ucupp2017@mail.ru

Куралай Сметкановна Исаева⁴

кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой биотехнологии
issayevakuralay@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4533-0188>

Наталья Ивановна Кульмакова⁴

доктор сельскохозяйственных наук, доцент
kni11@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0372-6109>

¹Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, ул. Мира, 22, Екатеринбург, 620062, Россия

²Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

³Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

⁴Торайгыров университет, ул. им. Ломова, 64, Павлодар, 140008, Казахстан

⁵Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Тимирязевская улица, 49, Москва, 127550, Россия

26. Gridina S.L., Gridin V.F., Sidorova D.V., Novitskaya K.V. Comparative Effect of Holsteinization on Milk Productivity of Black-and-White Cows. *Achievements of Science and Technology of AICis*. 2018; 32(8): 60–61. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10816>

27. Osipova V.I., Krovikova A.N. The relationship between the reproductive qualities of Holstein cows and their milk productivity. In: *Current State of Animal Husbandry and Its Development Trends: Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference*, Moscow, 2025. Moscow: Academy Print, 2025; 121–124 (in Russian). EDN OTZJHI

28. Zhang H. *et al.* Estimation of Genetic Parameters for Milk Production Rate and Its Stability in Holstein Population. *Animals*. 2024; 14(19): 2761. <https://doi.org/10.3390/ani14192761>

29. Miglior F., Fleming A., Malchiodi F., Brito L.F., Martin P., Baes C.F. A 100-Year Review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(12): 10251–10271. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12968>

ABOUT THE AUTHORS:

Artyom Sergeevich Gorelik¹

Candidate of Biological Sciences
temae077ex@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3362-2514>

Olga Vasilyevna Gorelik²

Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products
olgao205en@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9546-2069>

Maksim Borisovich Rebezov^{2,3}

- Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor, Chief Researcher²;
- Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products³

rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Svetlana Yurievna Kharlap²

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
proffuniver@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3651-8835>

Nikolay Armenakovich Eyriyan²

Candidate of Economic Sciences
ucupp2017@mail.ru

Kuralay Smetkanovna Isaeva⁴

Candidate of Technical Sciences, Professor, Head Department of Biotechnology
issayevakuralay@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4533-0188>

Natalia Ivanovna Kulmakova⁴

Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor
kni11@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0372-6109>

¹Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 22 Mira st., Yekaterinburg, 620062, Russia

²Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht st., Yekaterinburg, 620075, Russia

³Gorbatov Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin st., Moscow, 109316, Russia

⁴Toraighyrov University, 64 Lomov st., Pavlodar, 140008, Kazakhstan

⁵Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russia

В.И. Косилов¹
Ю.А. Юлдашбаев²
Е.А. Никонова¹ ✉
И.А. Рахимжанова¹
Р.Г. Калякина¹
О.А. Быкова³
Т.А. Седых^{4,5}
О.П. Неверова³
Ф.С. Амиршоев⁶

¹Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

²Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

³Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

⁴Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа, Россия

⁵Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

⁶Институт животноводства и пастбищ Таджикской академии сельскохозяйственных наук, Душанбе, Таджикистан

✉ nikonovaea84@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.01.2026

Принята к публикации: 26.01.2026

© Косилов В.И., Юлдашбаев Ю.А., Никонова Е.А., Рахимжанова И.А., Калякина Р.Г., Быкова О.А., Седых Т.А., Неверова О.П., Амиршоев Ф.С.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-68-75

Vladimir I. Kosilov¹
Yusupzhan A. Yuldashbaev²
Elena A. Nikonova¹ ✉
Ilmira A. Rakhimzhanova¹
Railya G. Kalyakina¹
Olga A. Bykova³
Tatiana A. Sedykh^{4,5}
Olga P. Neverova³
Fayzullo S. Amirshoev⁶

¹Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

²Timiryazev Russian State Agrarian University- Moscow Agrarian Academy, Moscow, Russia

³Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

⁴Bashkir State Pedagogical University named after Ml. Akmuella, Ufa, Russia

⁵Bashkir Scientific Research Institute of Agriculture is a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

⁶Institute of Animal Husbandry and Pastures of the Tajik Academy of Agricultural Sciences, Dushanbe, Tajikistan

✉ nikonovaea84@mail.ru

Received by the editorial office: 05.12.2025

Accepted in revised: 15.01.2026

Accepted for publication: 26.01.2026

© Kosilov V.I., Yuldashbaev Yu.A., Nikonova E.A., Rakhimzhanova I.A., Kalyakina R.G., Bykova O.A., Sedykh T.A., Neverova O.P., Amirshoev F.S.

Влияние генотипа и кастрации баранчиков на потребление и усвоение валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В результате проведения балансового опыта получены материалы, свидетельствующие о влиянии генотипа и кастрации баранчиков на потребление и использование валовой энергии питательных веществ кормов рациона.

Методика. С целью проведения эксперимента были подобраны группы подопытного молодняка: чистопородные баранчики цигайской породы — I группа; помесные баранчики первого поколения с эдильбаевской породой (½ цигайская × ½ эдильбаевская) — II группа; чистопородные валушки цигайской породы — III группа; помесные валушки (½ цигайская × ½ эдильбаевская) — IV группа.

Результаты. Установлено влияние генотипа и кастрации на количество потребленной и переваренной валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона, что оказало влияние на усвояемость ее в организме. Установлено, что вследствие проявления эффекта скрещивания помесный молодняк II и IV групп превосходил чистопородных сверстников I и III групп по потреблению валовой энергии протеина соответственно на 0,83 МДж (17,15%) и 0,77 МДж (17,23%), жира — на 0,34 МДж (16,75%) и 0,30 МДж (15,79%), клетчатки — на 1,14 МДж и 1,09 МДж (17,55%), БЭВ — на 2,10 МДж (16,87%) и 2,04 МДж (17,80%). По величине коэффициента переваримости валовой энергии протеина преимущество помесей II и IV групп составляло соответственно 1,18% и 0,68%, жира — 0,53% и 1,21%, клетчатки — 0,27% и 0,21%, БЭВ — 0,99% и 1,44%.

Ключевые слова: овцеводство, цигайская порода, помеси с эдильбаевской, баранчики, валушки, потребление и усвоение, валовая энергия питательных веществ кормов

Для цитирования: Косилов В.И. и др. Влияние генотипа и кастрации баранчиков на потребление и усвоение валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 68–75.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-68-75>

The influence of the genotype and castration of sheep on the consumption and assimilation of gross energy of individual nutrients in the feed diet

ABSTRACT

Introduction. The balance trial provided data indicating the influence of genotype and castration of ram lambs on the intake and utilization of gross energy from dietary nutrients.

Methodology. For the experiment, the following groups of young animals were formed: Group I: Purebred Tsigai ram lambs; Group II: First-generation crossbred ram lambs with Edilbai breed (½ Tsigai × ½ Edilbai); Group III: Purebred castrated males (wethers) of the Tsigai breed; Group IV: Crossbred castrated males (wethers) (½ Tsigai × ½ Edilbai).

Results. The influence of genotype and castration on the amount of consumed and digested gross energy from specific dietary nutrients was established, which subsequently affected its digestibility within the organism. It was found that due to the heterosis effect, the crossbred young animals in Groups II and IV outperformed their purebred counterparts in Groups I and III in terms of gross energy intake from: protein by 0.83 MJ (17.15%) and 0.77 MJ (17.23%), respectively; fat by 0.34 MJ (16.75%) and 0.30 MJ (15.79%), respectively; fiber by 1.14 MJ and 1.09 MJ (17.55%), respectively; nitrogen-free extract (NFE) by 2.10 MJ (16.87%) and 2.04 MJ (17.80%), respectively.

Regarding the coefficient of digestibility of gross energy, the advantage of the crossbred groups II and IV was: protein: 1.18% and 0.68%, respectively; fat: 0.53% and 1.21%, respectively; fiber: 0.27% and 0.21%, respectively; NFE: 0.99% and 1.44%, respectively.

Key words: sheep breeding, Tsigai breed, crossbreeds with Edilbaevsky, sheep, boulders, consumption and assimilation, gross energy of feed nutrients

For citation: Kosilov V.I. et al. The influence of the genotype and castration of sheep on the consumption and assimilation of gross energy of individual nutrients in the feed diet. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 68–75 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-68-75>

Введение/Introduction

Важнейшей задачей агропромышленного комплекса является увеличение производства животноводческой продукции с целью обеспечения продовольственной безопасности [1–5]. Для этого необходимо разработать комплекс мероприятий по развитию всех отраслей животноводства [6–9].

В первую очередь это создание прочной кормовой базы, так как лишь в этом случае появляется возможность более полного проявления генетического потенциала продуктивности разводимых в стране пород животных [10–13].

Кроме того, необходимо разработать и внедрить современные, ресурсосберегающие технологии выращивания животных, хорошо приспособленных к местным природно-географическим и кормовым условиям региона [14–18].

Традиционной отраслью для многих регионов Российской Федерации является овцеводство [19–22]. Его популярность обусловлена минимальной ресурсоемкостью и производством широкого ассортимента продукции [23, 24]. В первую очередь это ценные продукты питания, такие как мясо, бараний жир, молоко и продукты его переработки: сыры брынза. Кроме того овцеводство поставляет легкой промышленности шерсть, овчины, каракуль, смушки, тонкие кишки, шерстный жир.

Южный Урал, обладая большими массивами пастбищных угодий, издавна являлся регионом с развитым овцеводством [25–28]. Важным условием развития любой отрасли животноводства, в том числе и овцеводства, является широкое использование высокопродуктивных пород [29–33]. На Южном Урале широкое распространение получили животные цыгайской породы, являющейся древней породой полутонкорунного направления.

В настоящее время экономическая эффективность отрасли овцеводства во многом обусловлена рациональным использованием генетического потенциала мясной продуктивности овец [34–38].

Перспективным селекционным приемом, позволяющим существенно повысить мясные качества молодняка овец [39, 40], является межпородное скрещивание разводимых в регионе овец с баранами мясного и мясо-сального направления продуктивности [41–46].

В последнее время внимание селекционеров привлекает эдильбаевская порода овец. Животные этой породы характеризуются комплексом хозяйственно-полезных свойств таких как высокий уровень мясной продуктивности и качество

мясной продукции, скороспелость, выносливость. Эти ценные качества животные эдильбаевской породы устойчиво передают потомству как при чистопородном разведении, так и межпородном скрещивании [47–51].

Цель исследования — установить влияние генотипа, кастрации баранчиков на потребление и усвоение валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования были проведены в ООО «Нива» Оренбургской области Российской Федерации в 2024 г.

Для выполнения эксперимента были подобраны группы подопытного молодняка по 15 голов в каждой:

- I — цыгайская порода (баранчики)
- II — $\frac{1}{2}$ цыгайская \times $\frac{1}{2}$ эдильбаевская (баранчики),
- III — цыгайская порода, (валушки),
- IV — $\frac{1}{2}$ цыгайская \times $\frac{1}{2}$ эдильбаевская (валушки).

Содержание подопытного молодняка осуществляли по принятой в овцеводстве технологии¹.

В зимний сезон года животные в течение светового дня содержались в загонках, а в ночное время переводились в облегченные помещения. Рационы кормления животных подопытных групп включали корма, производимые в хозяйстве и составлялись в соответствии с детализированными нормами кормления (А.П. Калашников и др., 2023)². Они изменялись в зависимости от возраста и сезона года.

В летний сезон года животные содержались на пастбище, где основным кормом являлась пастбищная трава.

Для изучения особенностей потребления и использования валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона проводили балансовый опыт в возрасте 8 месяцев по общепринятым методикам³.

При проведении балансового опыта учитывали основы и принципы надлежащего содержания животных и ухода за ними.

Эксперименты проводили в соответствии с требованиями Директивы о защите животных, использующихся для научных целей⁴, и принципами обращения с животными согласно статье 4 ФЗ РФ № 498-ФЗ⁵.

Полученный экспериментальный материал обрабатывали методом вариационной статистики с использованием программного обеспечения Microsoft Excel (США). При этом вычисляли

¹ Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 1 ноября 2022 года № 774 «Об утверждении Ветеринарных правил содержания овец и коз в целях их воспроизводства, выращивания и реализации».

² Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. 3-е изд. (перераб. и доп.) / Под ред. А.П. Калашникова, В.И. Фисинина, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. Москва. 2003; 456. ISBN 5-94587-093-5

³ Методология и методы научных исследований в животноводстве: учебное пособие / сост. Е.Н. Мартынова. Ижевск: Ижевская ГСХА. 2019.

⁴ 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

⁵ 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».

среднее арифметическое (\bar{X}) и ошибку средней арифметической ($\pm Sx$)⁶.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Питательные вещества кормов рациона, поступившие в организм животного, при биологическом окислении выделяют энергию, которая расходуется на различные цели.

При этом на величину энергии влияет вид питательного вещества, а также генотип животного и его физиологическое состояние. Это положение нашло подтверждение и в наших исследованиях (табл.1).

При этом максимальное количество энергии выделилось при биологическом окислении безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) и клетчатки, а минимальное — жира и протеина, что обусловлено химическим составом кормов.

Вследствие проявления эффекта скрещивания помеси II и IV групп превосходили чистопородных сверстников I и III групп по потреблению энергии протеина соответственно на 0,83 МДж (17,15%, $P < 0,05$) и 0,77 МДж (17,23%), жира — 0,34 МДж (16,75%, $P < 0,05$) и 0,30 МДж (15,79%, $P < 0,05$), клетчатки — 1,14 МДж (16,91%, $P < 0,01$) и 1,09 МДж (17,55%, $P < 0,05$), БЭВ — 2,10 МДж (16,87%, $P < 0,01$) и 2,04 МДж (17,80%, $P < 0,01$).

Кастрация баранчиков оказала отрицательное влияние на потребление валовой энергии питательных веществ валушками. Вследствие этого валушки III и IV групп уступали баранчикам I и II групп по поступлению энергии протеина соответственно на 0,37 МДж (8,28%) и 0,43 МДж (8,21%), жира — на 0,13 МДж (6,84%) и 0,17 МДж (7,73%), клетчатки — на 0,53 МДж (8,53%) и 0,58 МДж (7,94%), БЭВ — на 0,99 МДж (8,64%) и 1,05 МДж (7,78%).

Аналогичные межгрупповые различия отмечались и по количеству переваренной энергии, поступившей с питательными веществами кормов рациона (табл.2).

При этом помесные баранчики и валушки II и IV групп превосходили чистопородных сверстников I и III групп по уровню переваренной энергии протеина соответственно на 0,59 МДж (19,34%, $P < 0,05$) и 0,52 МДж (18,50%, $P < 0,05$), жира — на 0,19 МДж (17,92%, $P < 0,05$), 0,26 МДж (28,26%, $P < 0,05$), клетчатки — на 0,57 МДж (17,59%, $P < 0,05$) и 0,54 МДж (18,06%, $P < 0,05$), БЭВ — на 1,67 МДж (18,45%, $P < 0,01$) и 1,65 МДж (20,17%, $P < 0,01$).

Установлено, что валушки III и IV групп вследствие меньшего потребления энергии питательных веществ кормов уступали баранчикам I и II групп по уровню ее переваривания. По энергии протеина это преимущество баранчиков I и II групп составляло соответственно 0,24 МДж (8,54%) и 0,31 МДж (9,31%), жира — 0,14 МДж (15,22%) и

Таблица 1. Поступление валовой энергии с питательными веществами кормов рациона в организм баранчиков и валушков, МДж

Table 1. The intake of gross energy with the nutrients of the diet feed into the body of sheep and boulders, MJ

Показатель	Группа			
	I	II	III	IV
Протеин	4,84 ± 0,34	5,67 ± 0,37	4,47 ± 0,32	5,24 ± 0,37
Жир	2,03 ± 0,20	2,37 ± 0,24	1,90 ± 0,21	2,20 ± 0,26
Клетчатка	6,74 ± 0,41	7,88 ± 0,50	6,21 ± 0,39	7,30 ± 0,44
БЭВ	12,45 ± 0,74	14,55 ± 0,81	11,46 ± 0,70	13,50 ± 0,73

Таблица 2. Переваримость валовой энергии, поступившей с питательными веществами кормов рациона в организме баранчиков и валушков, МДж

Table 2. Digestibility of gross energy supplied with nutrients of forages of the diet in the organism of lambs and jacks, MJ

Показатель	Группа			
	I	II	III	IV
Протеин	3,05 ± 0,32	3,64 ± 0,34	2,81 ± 0,30	3,33 ± 0,33
Жир	1,06 ± 0,17	1,25 ± 0,19	0,92 ± 0,18	1,18 ± 0,21
Клетчатка	3,24 ± 0,34	3,81 ± 0,37	2,99 ± 0,32	3,53 ± 0,33
БЭВ	9,05 ± 0,50	10,72 ± 0,52	8,18 ± 0,48	9,83 ± 0,52

Таблица 3. Коэффициент переваримости валовой энергии питательных веществ кормов баранчиков и валушками, %

Table 3. Coefficient of digestibility of gross energy of nutrients of forages of lambs and jacks, %

Показатель	Группа			
	I	II	III	IV
Протеин	63,02 ± 0,06	64,20 ± 0,08	62,87 ± 0,05	63,55 ± 0,07
Жир	52,22 ± 0,03	52,75 ± 0,05	52,43 ± 0,02	53,64 ± 0,04
Клетчатка	48,08 ± 0,04	48,35 ± 0,11	48,15 ± 0,09	48,36 ± 0,12
БЭВ	72,69 ± 0,13	73,68 ± 0,16	71,38 ± 0,14	72,82 ± 0,18

0,07 МДж (5,93%), клетчатки — 0,25 МДж (8,36%) и 0,28 МДж (7,93%), БЭВ — 0,87 МДж (10,63%) и 0,89 МДж (9,05%).

Важным показателем, характеризующим эффективность использования валовой энергии питательных веществ кормов рациона в обменных процессах в организме, является коэффициент ее переваримости.

Полученные данные свидетельствуют, что максимальной величиной анализируемого показателя отличались безазотистые экстрактивные вещества и протеин, минимальной — клетчатка (табл.3).

При этом отмечено влияние генотипа молодняка на величину коэффициента переваримости валовой энергии при преимуществе помесного молодняка II и IV групп. Чистопородные сверстники I и III групп уступали им по уровню коэффициента переваримости протеина соответственно на 1,18% и 0,68%, жира — на 0,53% и 1,21%, клетчатки — на 0,27% и 0,21%, БЭВ — на 0,99% и 1,44%.

Характерно, что кастрация баранчиков приводила к снижению величины коэффициента переваримости валовой энергии в организме валушков.

⁶ Плохинский Н. А. Биометрия. 2-е изд. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 367 с.

Вследствие этого баранчики I и II групп превосходили валушков III и IV групп по уровню коэффициента переваримости энергии протеина соответственно на 0,15% и 0,65%, БЭВ- на 1,31% и 0,86%.

По величине коэффициента переваримости энергии клетчатки существенных межгрупповых различий не отмечалось.

По жиру чистопородные баранчики I группы превосходили валушков III группы на 0,21%, а помесные баранчики II группы уступали помесным валушкам IV группы на 0,89%.

Выводы/Conclusions

Полученные экспериментальные данные и их анализ свидетельствуют, что помесный молодняк вследствие проявления эффекта

скрещивания превосходил чистопородных сверстников по потреблению и использованию валовой энергии отдельных питательных веществ кормов рациона.

Так по потреблению валовой энергии питательных веществ помеси превосходили цигаиских сверстников на 0,34-2,10 МДж (16,75-16,87%,) и 0,30-2,04 МДж (15,79-17,80%).

Повышенное потребление валовой энергии молодняком комбинированного генотипа обусловило лучшее ее использование в обменных процессах, что нашло свое выражение в преимуществе по величине коэффициента ее переваримости, которое составляло 0,27-1,44%.

При кастрации баранчиков отмечалось снижение потребления валовой энергии, ухудшение ее переваримости и использования.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельева М.И., Захаров А.Н. Цифровая трансформация и инновации для укрепления продовольственной безопасности. *Все о мясе*. 2024; (6): 73–84. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-6-73-80>.
2. Минаков И.А., Сытова А.Ю. Развитие аграрной экономики региона и обеспечение продовольственной безопасности. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2024; 8: 43–49. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-8-43-49>.
3. Жуманова Г.Т., Асенова Б.К., Ребезов М.Б., Кабышева Ж.К., Бакирова Л.С. Обеспечение пищевой безопасности Республики Казахстан. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2019; (2): 29–33. <https://elibrary.ru/dgdnif>.
4. Наумова Н.Л., Ребезов М.Б. Микроэлементный статус челябинцев как обоснование развития производства обогащенных продуктов питания. *Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы*. 2014; (4): 33–34. <https://elibrary.ru/wwwbyaz>.
5. Губер Н.Б., Ребезов М.Б., Топурия Г.М. Инструменты снижения рисков при реализации инновационных проектов в сфере продуктов питания животного происхождения. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2014; 8(1): 156–159. <https://elibrary.ru/sagwif>.
6. Симоненкова Д.Р., Блинова А.А., Кузнецова С.О. Научное обеспечение инновационного развития животноводства. *Роль аграрной науки в устойчивом развитии АПК: материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной 73-летию Курского ГАУ*. Курск: Курский государственный аграрный университет имени И.И. Иванова. 2024; 40–45. <https://elibrary.ru/szltue>.
7. Савицкий Р.А. Динамика и приоритеты развития животноводства в Краснодарском крае. *Виртуозы науки: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных за 2023 г.* Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 837–838. <https://elibrary.ru/dnsitu>.
8. Кульбаева Г.Р., Аманязов А.Я. Развитие животноводства в сельском хозяйстве. *Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященный памяти доктора биологических наук, профессора, Заслуженного работника Высшей школы РФ, Почётного работника высшего профессионального образования РФ, Почётного профессора Брянской ГСХА, Почётного гражданина Брянской области Егора Павловича Ващекина*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2025; 613–618. <https://elibrary.ru/kzlriv>.
9. Созинова А.И. Развитие животноводства как приоритетного направления политики государств. *Знания молодых — будущее России: сборник статей XXII Международной студенческой научной конференции*. Киров: Вятский государственный агротехнологический университет. 2024; 324–328. <https://elibrary.ru/crmmdid>.

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.

REFERENCES

1. Savelyeva M.I., Zakharov A.N. Digital transformation and innovation for strengthening food security. *Vse o myase*. 2024; (6): 73–84 (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-6-73-80>.
2. Minakov I.A., Sytova A.Yu. Development of the regional agricultural economy and ensuring food security. *Economy of agricultural and processing enterprises*. 2024; 8: 43–49 (in Russian). <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-8-43-49>.
3. Zhumanova G.T., Asenova B.K., Rebezov M.B., Kabysheva Zh.K., Bakirova L.S. Ensuring Food Security in the Republic of Kazakhstan. *Bulletin of the Almaty Technological University*. 2019; (2): 29–33 (in Russian). <https://elibrary.ru/dgdnif>.
4. Naumova N.L., Rebezov M.B. Microelement Status of Chelyabinsk Residents as a Justification for the Development of Fortified Food Production. *Rational Nutrition, Food Additives and Biostimulants*. 2014; (4): 33–34 (in Russian). <https://elibrary.ru/wwwbyaz>.
5. Guber N.B., Rebezov M.B., Topuria G.M. Risk Reduction Tools for Implementing Innovative Projects in the Sphere of Animal-Origin Food Products. *Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*. 2014; 8(1): 156–159 (in Russian). <https://elibrary.ru/sagwif>.
6. Simonenkova D.R., Blinova A.A., Kuznetsova S.O. Scientific Support for Innovative Development of Animal Husbandry. *The Role of Agricultural Science in Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 73rd Anniversary of Kursk State Agrarian University*. Kursk: Kursk State Agrarian University named after I.I. Ivanov. 2024; 40–45 (in Russian). <https://elibrary.ru/szltue>.
7. Savitsky R.A. Dynamics and Priorities of Livestock Development in Krasnodar Krai. *Virtuosos of Science: Collection of Abstracts of the International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists for 2023*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 837–838 (in Russian). <https://elibrary.ru/dnsitu>.
8. Kulbaeva G.R., Amaniayov A.Ya. Development of Livestock Breeding in Agriculture. *Current issues of intensive development of animal husbandry: a collection of scientific papers from the international scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Professor of the Bryansk State Agricultural Academy, Honorary Citizen of the Bryansk Region E.P. Vashchekin*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 613–618 (in Russian). <https://elibrary.ru/kzlriv>.
9. Sozinova A.I. Development of animal husbandry as a priority area of state policy. *The Knowledge of the Young is the Future of Russia: A Collection of Articles from the XXII International Student Scientific Conference*. Kirov: Vyatka State Agrotechnological University. 2024; 324–328 (in Russian). <https://elibrary.ru/crmmdid>.

10. Фарков А.Г. Приоритетные направления развития кормовой базы животноводства в приграничных районах России и Монголии на основе биотехнологий. *Вектор экономики*. 2020; 5(47): 46. <https://elibrary.ru/gfyrty>.

11. Забашта Н.Н., Головкин Е.Н., Лисовицкая Е.П., Синельщикова И.А. Кормовая база молодняка овец, выращиваемых для производства детского питания. *Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии*. Краснодар: Краснодарский научный центр по зоотехнии и ветеринарии. 2022; 11(1): 116–120. <https://doi.org/10.48612/sbornik-2022-1-27>.

12. Ребезов М.Б., Максимюк Н.Н. Применение прогрессивных технологий заготовки и приготовления кормов для качественной кормовой базы молочного скотоводства. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016; (12-6): 1082–1087. <https://elibrary.ru/xhijkv>.

13. Каунова Л.М., Королёва Е.А. Проблемы развития кормовой базы в нашей стране для животноводства. *Актуальные проблемы интенсивного развития в АПК: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Дню работника сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности*. Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. 2023; 76–78. <https://elibrary.ru/lfiqpe>.

14. Гриценко С.А., Гриценко М.Д., Ребезов М.Б., Мухамбетов Д.Г., Хакназаров А.А.У. Мясная продуктивность бычков и особенности ее наследования в условиях промышленного производства. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024; 4(9): 192–202. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_25](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_25).

15. Ключкова М.А., Ребезов М.Б., Хайруллина Ф.Р. Эффективность скрещивания эдильбаевской и цигайской пород овец на Южном Урале. *Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК: сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием*. Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева. 2021; 741–744. <https://elibrary.ru/yqufsq>.

16. Герасимова Т.Г., Ребезов М.Б., Лукин Е.В. Шерстная продуктивность овец разного генотипа. *Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: Сборник трудов по материалам национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти доктора биологических наук, профессора, Заслуженного работника Высшей школы РФ, Почетного работника высшего профессионального образования РФ, Почетного гражданина Брянской области Егора Павловича Ващекина*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2022; 1(1): 300–303. <https://elibrary.ru/fkpdfx>.

17. Кубатбеков Т.С. и др. Влияние скрещивания черно-пестрого скота с голштинами на убойные качества помесного молодняка. *Мичуринский агрономический вестник*. 2021; (1): 54–59. <https://elibrary.ru/ymcgjl>.

18. Фаткуллин Р.Р., Белооков А.А., Ермолова Е.М., Ребезов М.Б., Максимова Р.А. Способ повышения сохранности и продуктивных качеств молодняка крупного рогатого скота. *Аграрная наука*. 2023; (9): 43–46. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-43-46>.

19. Ерохин А.И., Карасев Е.А., Ерохин С.А. Состояние, динамика и тенденции в развитии овцеводства в мире и в России. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2019; 3: 3–6. <https://elibrary.ru/ovqfle>.

20. Войтюк М.М., Мачнева О.П. Современное состояние овцеводства в России. *Эффективное животноводство*. 2021; 170 (4): 102–105. <https://elibrary.ru/zcbxpx>.

21. Шкилёв П.Н., Косилов В.И., Никонова Е.А. Возрастные изменения некоторых анатомических частей туши молодняка овец Южного Урала. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2014; 2: 24–26. <https://elibrary.ru/tfptoh>.

22. Кубатбеков Т.С., Юлдашбаев Ю.А., Косилов В.И., Ребезов М.Б., Абдурасулов А.Х. Качественные показатели мышечной ткани молодняка овец разного пола. *Вестник Ошского государственного университета*. 2021; 1–2: 338–344. <https://elibrary.ru/gbupvd>.

23. Трухачев В.И., Ерохин А.И., Юлдашбаев Ю.А., Ерохин С.А. Вектор развития овцеводства в мире и России. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2023; 4: 3–9. <https://elibrary.ru/alzcan>.

24. Косилов В.И. и др. Эффективность использования генетических ресурсов овец в разных природно-климатических условиях. *Элиста: Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова*. 2019; 206. ISBN: 978-5-91458-314-6 <https://elibrary.ru/uajfea>.

10. Farkov A.G. Priority directions for the development of the feed base for livestock farming in the border regions of Russia and Mongolia based on biointensive technologies. *Vector of Economy*. 2020; 5(47): 46 (in Russian). <https://elibrary.ru/gfyrty>.

11. Zabashta N.N., Golovko E.N., Lisovitskaya E.P., Sinelshchikova I.A. Forage base for young sheep raised for baby food production. *Collection of scientific papers of the Krasnodar Scientific Center for Animal Science and Veterinary Medicine*. Krasnodar: Krasnodar Scientific Center for Animal Science and Veterinary Medicine. 2022; 11(1): 116–120 (in Russian). <https://doi.org/10.48612/sbornik-2022-1-27>.

12. Rebezov M.B., Maksimuk N.N. Application of progressive feed procurement and preparation technologies for a high-quality forage base for dairy cattle farming. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016; (12-6): 1082–1087 (in Russian). <https://elibrary.ru/xhijkv>.

13. Kaunova L.M., Koroleva E.A. Problems of development of the forage base in our country for animal husbandry. *Actual problems of intensive development in the agro-industrial complex: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the Day of agricultural and processing industry workers*. Velikiye Luki: Velikiye Luki State Agricultural Academy. 2023; 76–78 (in Russian). <https://elibrary.ru/lfiqpe>.

14. Gritsenko S.A., Gritsenko M.D., Rebezov M.B., Mukhambetov D.G., Khaknazarov A.A.U. Meat productivity of bulls and features of its inheritance in industrial production conditions. *Bulletin of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary science and animal science*. 2024; 4(9): 192–202 (in Russian). [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_25](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_25).

15. Klochova M.A., Rebezov M.B., Khairullina F.R. Efficiency of crossing the Edilbaev and Tsigai sheep breeds in the Southern Urals. *Achievements and Prospects of Scientific and Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: a collection of articles based on the materials of the II All-Russian (National) Scientific and Practical Conference with International Participation*. Kurgan: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev. 2021; 741–744 (in Russian). <https://elibrary.ru/yqufsq>.

16. Gerasimova T.G., Rebezov M.B., Lukin E.V. Wool productivity of sheep of different genotypes. *Actual problems of intensive development of animal husbandry: Collection of papers based on the materials of the national scientific and practical conference with international participation, dedicated to the memory of Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Citizen of the Bryansk Region E.P. Vashchekin*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2022; 1(1): 300–303 (in Russian). <https://elibrary.ru/fkpdfx>.

17. Kubatbekov T.S. et al. The Effect of Crossbreeding Black-and-White Cattle with Holsteins on the Slaughter Qualities of Crossbred Young Animals. *Michurinsk agronomy bulletin*. 2021; (1): 54–59. (in Russian). <https://elibrary.ru/ymcgjl>.

18. Fatkullin R.R., Belookov A.A., Ermolova E.M., Rebezov M.B., Maksimova R.A. A Method for Improving the Survivability and Productivity of Young Cattle. *Agrarian Science*. 2023; (9): 43–46. (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-43-46>.

19. Erokhin A.I., Karasev E.A., Erokhin S.A. The state, dynamics and trends in the development of sheep breeding in the world and in Russia. *Sheep, goats, wool business*. 2019; 3: 3–6 (in Russian). <https://elibrary.ru/ovqfle>.

20. Voityuk M.M., Machneva O.P. The current state of sheep breeding in Russia *Effektivnoye zhivotnovodstvo = Effective animal husbandry*. 2021; 170 (4): 102–105 (in Russian). <https://elibrary.ru/zcbxpx>.

21. Shkilev P. N., Kosilov V.I., Nikonova E.A. Age-related changes in some anatomical parts of the carcass of young sheep of the Southern Urals. *Sheep, goats, wool business*. 2014; 2: 24–26 (in Russian). <https://elibrary.ru/tfptoh>.

22. Kubatbekov T.S., Yuldashbaev Yu.A., Kosilov V.I., Rebezov M.B., Abdurasulov A.H. Qualitative indicators of muscle tissue of young sheep of different sexes. *Bulletin of Osh State University*. 2021; 1–2: 338–344 (in Russian). <https://elibrary.ru/gbupvd>.

23. Trukhachev V.I., Erokhin A.I., Yuldashbaev Yu.A., Erokhin S.A. The vector of sheep breeding development in the world and Russia. *Sheep, goats, wool business*. 2023; 4: 3-9 (in Russian). <https://elibrary.ru/alzcan>.

24. Kosilov V.I. et al. Efficiency of using sheep genetic resources in different natural and climatic conditions. *Elista: Kalmyk State University named after B.B. Gorodovikov*. 2019; 206. ISBN: 978-5-91458-314-6 (in Russian). <https://elibrary.ru/uajfea>.

25. Литовченко В.Г., Галатов А.Н., Иванов В.А. Проблемы овцеводства на Южном Урале и не только. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2014; (4): 8–9. <https://elibrary.ru/tfpfzz>.
26. Андриенко Д.А., Траисов Б.Б., Джапарова А.К. Эффективность выращивания баранчиков, валушков и ярок разных генотипов на Южном Урале. *Биотехнологические аспекты управления технологиями пищевых продуктов в условиях международной конкуренции: Сборник статей по материалам Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева. 2019; 434–438. <https://www.elibrary.ru/rpecnq>
27. Глянькова Л.М., Галатов А.Н., Хомченко Н.П. Современный взгляд на развитие овцеводства на Южном Урале. *Главный зоотехник*. 2012; (9): 51–54. <https://elibrary.ru/pdvsod>.
28. Глянькова Л.М., Галатов А.Н. Новый взгляд на развитие овцеводства на Южном Урале. *Зоотехния*. 2012; (10): 23–24. <https://elibrary.ru/pewavr>.
29. Юлдашбаев Ю.А. и др. Влияние генотипа баранчиков на минеральный обмен. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2024; 1: 15–18. <https://elibrary.ru/hwwlww>
30. Давлетова А.М., Смагулов Д.Б., Траисов Б.Б., Тулебаев Б., Кубатбеков Т.С. Продуктивные качества курдючных овец Западно-Казахстанской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020; 2(82): 267–270. <https://elibrary.ru/qqwgom>
31. Косилов В.И. и др. Показатели белкового и углеводного обмена крови чистопородных и помесных валушков по сезонам года. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025; 112(2): 197–200. <https://elibrary.ru/bqyovo>
32. Рахимжанова И.А. и др. Возрастная динамика молодняка цыгайской породы и ее помесей с эдильбаевской. *Мичуринский агрономический вестник*. 2022; 2: 21–26. <https://elibrary.ru/ekszlr>
33. Лушников В.П., Стрильчук А.А. Мясная продуктивность баранчиков эдильбаевской породы в зависимости от размера курдюка. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2023; 1: 23–25. <https://elibrary.ru/zxkvhn>
34. Амирова Р.И. Особенности весового роста молодняка овец романовской породы в подсосный период. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024; 108(4): 304–308. <https://elibrary.ru/pvcick>
35. Комарова Н.К., Рахимжанова И.А., Кошкин И.П., Быкова О.А., Ребезов М.Б., Седых Т.А. Энергетическая ценность, йодное число и температура плавления жировой ткани туши баранчиков романовской породы и ее помесей разных поколений с эдильбаевской. *Мичуринский агрономический вестник*. 2023; 2: 12–15. <https://elibrary.ru/hrxkcy>
36. Иргашев Т.А., Косилов В.И., Рахимов Ш.Т., Кубатбеков Т.С., Миронова И.В. Эколого-генетические аспекты продуктивных качеств овец разного направления. Душанбе: *ЭР-Граф*. 2019: 355. <https://elibrary.ru/bqbsbo>
37. Косилов В.И., Шкилев П.Н., Никонова Е.А., Андриенко Д.А. Особенности изменения гематологических показателей молодняка овец основных пород Южного Урала под влиянием пола, возраста и сезона года. *Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства*. Ставрополь: Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства. 2013; 6(1): 53–64. <https://elibrary.ru/qbprnj>
38. Косилов В.И., Никонова Е.А., Давлетова А.М., Траисов Б.Б., Неверова О.П., Быкова О.А. Эффективность производства баранины в курдючном овцеводстве. Екатеринбург: *Издательский дом «Ажур»*. 2024: 176. ISBN: 978-5-91256-649-3 <https://elibrary.ru/zspqfv>
39. Шевхужев А.Ф., Бовкун Ю.И. Развитие мясошерстного кроссбредного овцеводства в Карачаево-Черкесии. *Зоотехния*. 2000; 7: 8–10. <https://elibrary.ru/uwoftt>
40. Андриенко Д.А., Никонова Е.А., Шкилев П.Н. Состояние и тенденция развития овцеводства на Южном Урале. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2008; 17(1): 86–88. <https://elibrary.ru/mhvtv>
41. Шкилев П.Н., Газеев И.Р., Никонова Е.А. Биологическая ценность мяса овец цыгайской, южноуральской и ставропольской с учетом возраста, пола и кастрации. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011; 1(29): 181–185. <https://elibrary.ru/ndrggt>
42. Скорых Л.Н., Вольный Д.Н., Абонеев Д.В. Рост и развитие молодняка овец, полученных в результате промышленного скрещивания. *Зоотехния*. 2009; 11: 26–28. <https://elibrary.ru/kyqlux>
25. Litovchenko V.G., Galatov A.N., Ivanov V.A. Problems of sheep breeding in the Southern Urals and elsewhere. *Sheep, goats, wool business*. 2014; (4): 8–9 (in Russian). <https://elibrary.ru/tfpfzz>.
26. Andrienko D.A., Traisov B.B., Dzhaparova A.K. Efficiency of growing rams, wethers, and ewe lambs of different genotypes in the Southern Urals. *Biotechnological aspects of food technology management in the context of international competition: Collection of articles based on the materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference*. Kurgan: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev. 2019; 434–438 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/rpecnq>
27. Glyankova L.M., Galatov A.N., Khomchenko N.P. A modern view on the development of sheep breeding in the Southern Urals. *Head of Animal Breeding*. 2012; (9): 51–54 (in Russian). <https://elibrary.ru/pdvsod>.
28. Glyankova L.M., Galatov A.N. A new view on the development of sheep breeding in the Southern Urals. *Zootekniya*. 2012; (10): 23–24 (in Russian). <https://elibrary.ru/pewavr>.
29. Yuldashbaev Yu.A. et al. The influence of the sheep genotype on the mineral metabolism. *Sheep, goats, wool business*. 2024; 1: 15–18 (in Russian). <https://elibrary.ru/hwwlww>
30. Davletova A.M., Smagulov D.B., Traisov B.B., Tulebaev B., Kubatbekov T.I. Productive qualities of fat-tailed sheep of the West Kazakhstan region. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020; 2(82): 267–270 (in Russian). <https://elibrary.ru/qqwgom>
31. Kosilov V.I. et al. Indicators of protein and carbohydrate metabolism of blood of purebred and mongrel boulders by seasons of the year. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025; 112(2): 197–200 (in Russian). <https://elibrary.ru/bqyovo>
32. Rakhimzhanova I.A. et al. Age dynamics of young Tsigai breed and its hybrids with Edilbaevskaya. *Michurinsk agronomy bulletin*. 2022; 2: 21–26 (in Russian). <https://elibrary.ru/ekszlr>
33. Lushnikov V.P., Strilchuk A.A. Meat productivity of sheep of the Edilbaev breed depends on the size of the chicken. *Sheep, goats, wool business*. 2023; 1: 23–25 (in Russian). <https://elibrary.ru/zxkvhn>
34. Amirova R.I. Features of weight growth of young Romanov sheep in the suckling period. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024; 108(4): 304–308 (in Russian). <https://elibrary.ru/pvcick>
35. Komarova N.K., Rakhimzhanova I.A., Koshkin I.P., Bykova O.A., Rebezov M.B., Sedykh T.A. Energy value, iodine number and melting point of fatty tissue of Romanov sheep carcasses and its crossbreeds of different generations with Edilbaevskaya. *Michurinsky Agronomic Bulletin*. 2023; 2: 12–15 (in Russian). <https://elibrary.ru/hrxkcy>
36. Irgashev T.A., Kosilov V.I., Rakhimov Sh.T., Kubatbekov T.S., Mironova I.V. Ecological and genetic aspects of productive qualities of sheep of different directions. Dushanbe: *ER-Graf*. 2019: 355 (in Russian). <https://elibrary.ru/bqbsbo>
37. Kosilov V.I., Shkilev P.N., Nikonova E.A., Andrienko D.A. Features of changes in hematological parameters of young sheep of the main breeds of the Southern Urals under the influence of sex, age and season of the year. *Collection of scientific papers of the Stavropol Research Institute of Animal Husbandry and Forage Production*. Stavropol: All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Breeding. 2013; 6(1): 53–64 (in Russian). <https://elibrary.ru/qbprnj>
38. Kosilov V.I., Nikonova E.A., Davletova A.M., Traisov B.B., Neverova O.P., Bykova O.A. Efficiency of mutton production in fat-tail sheep breeding. Yekaterinburg: *Publishing House "Azhar"*. 2024: 176. ISBN: 978-5-91256-649-3 (in Russian). <https://elibrary.ru/zspqfv>
39. Shevkuzhev A.F., Bovkun Yu.I. Development of meat-wool crossbred sheep breeding in Karachay-Cherkessia. *Zootekniya*. 2000; 7: 8–10 (in Russian). <https://elibrary.ru/uwoftt>
40. Andrienko D.A., Nikonova E.A., Shkilev P.N. The state and development trend of sheep breeding in the Southern Urals. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2008; 17(1): 86–88 (in Russian). <https://elibrary.ru/mhvtv>
41. Shkilev P.N., Gazeev I.R., Nikonova E.A. The biological value of sheep meat from Tsigai, Yuzhnouralsky and Stavropol, taking into account age, gender and castration. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2011; 1(29): 181–185 (in Russian). <https://elibrary.ru/ndrggt>
42. Skorykh L.N., Volny D.N., Aboneev D.V. Growth and development of young sheep obtained as a result of industrial crossing. *Zootekniya*. 2009; 11: 26–28 (in Russian). <https://elibrary.ru/kyqlux>

43. Никонova E.A. и др. Интенсивность роста баранчиков романовской породы и ее помесей с эдильбаевской разных поколений. *Наука и образование*. 2022; 4-3(69): 3–9. <https://elibrary.ru/cwrsdz>
44. Карабаева М.Э., Колотова Н.А. Мясная продуктивность и качество мяса молодняка овец разных генотипов. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2015; 4: 23–26. <https://elibrary.ru/vqegxj>
45. Косилов В.И. и др. Влияние генотипа валушков на пищевую ценность мясной продукции. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025; 2(112): 286–289. <https://elibrary.ru/dcfoye>
46. Салионова М.И., Сеитов М.С., Лайпанов Т.А. Результаты скрещивания овец отечественных пород с баранами мясных пород зарубежной селекции. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025; 2(112): 290–295. <https://elibrary.ru/mkjtkl>
47. Шеина Е.С., Шарапова Н.А. Характеристика эдильбаевской породы овец и эффективность их использования. *Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы Международной научной конференции*. Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина. 2023; (3): 377. <https://elibrary.ru/dblvqg>
48. Осепаев А.Н., Рогозинникова И.В. Мясная продуктивность баранов эдильбаевской породы. *Современные технологии птицеводства и мелкого животноводства: сборник материалов круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023; 226–227. <https://elibrary.ru/iopqkn>
49. Лушников В.П., Стрильчук А.А., Фетисова Т.О. Эффективность использования баранчиков эдильбаевской и татарстанской породы в производстве молодой баранины. *Аграрная наука и инновационное развитие животноводства — основа главной безопасности продовольствия: материалы II Национальной научно-практической конференции с международным участием*. Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова. 2023; 107–110. <https://elibrary.ru/vkxlfz>
50. Исаев А.Н., Хасаншин Э.Р., Губина А.В. Рост и развитие молодняка овец эдильбаевской породы в крестьянско-фермерском хозяйстве. *Инновационные идеи молодых исследователей для агро-промышленного комплекса: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2024; 157–161. <https://elibrary.ru/fvblmx>
51. Молчанов А.В., Саенко А.Ю., Козин А.Н. Качественные характеристики жировой ткани чистопородных и помесных баранчиков эдильбаевской породы. *Молодые ученые - науке и практике АПК: Материалы Международной научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых*. Витебск: Витебская государственная академия ветеринарной медицины. 2024; 620–623. <https://elibrary.ru/mestqr>
43. Nikonova E.A. et al. The growth rate of the Romanov sheep breed and its hybrids with the Edilbaev breed of different generations. *Science and Education*. 2022; 4-3(69): 3–9 (in Russian). <https://elibrary.ru/cwrsdz>
44. Karabaeva M.E., Grobova N.A. Meat productivity and quality of young sheep meat of different genotypes. *Sheep, goats, wool business*. 2015; 4: 23–26 (in Russian). <https://elibrary.ru/vqegxj>
45. Kosilov V.I. et al. The influence of the boulder genotype on the nutritional value of meat products. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025; 2(112): 286–289 (in Russian). <https://elibrary.ru/dcfoye>
46. Salionova M.I., Seitov M.S., Laipanov T.A. Results of crossing sheep of domestic breeds with sheep of meat breeds of foreign breeding. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025; 2(112): 290–295 (in Russian). <https://elibrary.ru/mkjtkl>
47. Sheina E.S., Sharapova N.A. Characteristics of the Edilbaevskaya sheep breed and the efficiency of their use. *Gorin Readings. Innovative Solutions for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific Conference*. Maisky: Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin. 2023; (3): 377 (in Russian). <https://elibrary.ru/dblvqg>
48. Osepyan A.N., Rogozinnikova I.V. Meat Productivity of Edilbaevskaya Rams. *Modern Technologies of Poultry Farming and Small Animal Husbandry: Collection of Materials from a Round Table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2023; 226–227 (in Russian). <https://elibrary.ru/iopqkn>
49. Lushnikov V.P., Strilchuk A.A., Fetisova T.O. Efficiency of using Edilbaev and Tatarstan rams in young lamb production. *Agricultural science and innovative development of animal husbandry are the basis for food security: Proceedings of the II National Scientific and Practical Conference with International Participation*. Saratov: Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov. 2023; 107–110 (in Russian). <https://elibrary.ru/vkxlfz>
50. Isayan A.N., Khasanshin E.R., Gubina A.V. Growth and development of young Edilbaev sheep in a peasant farm. *Innovative ideas of young researchers for the agro-industrial complex: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists*. Penza: Penza State Agrarian University. 2024; 157–161 (in Russian). <https://elibrary.ru/fvblmx>
51. Molchanov A.V., Saenko A.Yu., Kozin A.N. Qualitative characteristics of adipose tissue of purebred and crossbred Edilbaev rams. *Young scientists - for science and practice of the agro-industrial complex: Materials of the International scientific and practical conference of graduate students and young scientists*. Vitebsk: Vitebsk State Academy of Veterinary Medicine. 2024; 620–623 (in Russian). <https://elibrary.ru/mestqr>

ОБ АВТОРАХ:

Владимир Иванович Косилов¹

доктор сельскохозяйственных наук,
профессор, профессор кафедры технологии
производства и переработки продукции животноводства
Kosilov_vi@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4754-1771>

Юсупжан Артыкович Юлдашбаев²

доктор сельскохозяйственных наук,
профессор, академик Российской академии наук
zoo@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7150-1131>

Елена Анатольевна Никонova¹

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры
технологии производства и переработки продукции
животноводства
nikonovaea84@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0906-8362>

Ильмира Агзамовна Рахимжанова¹

доктор сельскохозяйственных наук, профессор
kaf36@orensau.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7771-7291>

Раиля Губайдулловна Калякина¹

кандидат биологических наук, доцент
kalyakina_railya@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8892-0669>

ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir Ivanovich Kosilov¹

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
professor of the Department of Technology
of Production and Processing of livestock products
Kosilov_vi@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4754-1771>

Yusupzhan Artykovich Yuldashbaev²

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
zoo@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7150-1131>

Elena Anatolievna Nikonova¹

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>

Ilmira Agzamovna Rakhimzhanova¹

Doctor of Agricultural Sciences, Professor
kaf36@orensau.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7771-7291>

Railya Gubaidullovna Kalyakina¹

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
kalyakina_railya@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8892-0669>

Ольга Александровна Быкова³

доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор
кафедры биотехнологии и пищевых продуктов
olbyk75@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5401-3179>

Татьяна Александровна Седых^{4,5}

доктор биологических наук, доцент
nio-bsau@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5401-3179>

Ольга Петровна Неверова³

кандидат биологических наук, доцент, заведующая
кафедрой биотехнологии и пищевых продуктов
opneverova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2474-2290>

Файзулло Сафарович Амиршоев⁶

доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент Таджикской академии
сельскохозяйственных наук, affaizullo64@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-2241-5606>

Olga Aleksandrovna Bykova³

Doctor of agricultural sciences, Associate Professor, Professor
of the Department of Biotechnology and Foodstuffs
olbyk75@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5401-3179>

Tatiana Aleksandrovna Sedykh^{4,5}

Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,
nio-bsau@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5401-3179>

Olga Petrovna Neverova³

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head
of the Department of Biotechnology and Food Products
opneverova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2474-2290>

Fayzullo Safarovich Amirshoev⁶

Doctor of Biology Sciences, Professor, Corresponding
Member of the Tajik Academy of Agricultural Sciences,
affaizullo64@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-2241-5606>

¹Оренбургский государственный аграрный университет,
ул. Челюскинцев, 18, Оренбург, 460014, Россия

²Российский государственный аграрный университет —
МСХА им. К.А. Тимирязева,
ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127434, Россия

³Уральский государственный аграрный университет,
ул. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

⁴Башкирский государственный педагогический
университет им. М. Акмуллы,
ул. Октябрьской революции, 3А, Уфа, 450077, Россия

⁵Башкирский научно-исследовательский институт
сельского хозяйства-обособленное структурное
подразделение Уфимского федерального
исследовательского центра Российской академии наук,
ул. им. Рихарда Зорге, 19, Уфа, 450059, Россия

⁶Институт животноводства и пастбищ Таджикской
академии сельскохозяйственных наук
ул. Гипрозем, д. 17, Душанбе, 734001, Таджикистан

¹Orenburg State Agrarian University, Orenburg
18 Chelyuskintsev st., Orenburg, 460014, Russia

²All-Russian State Agrarian University-Timiryazev Agricultural
Academy,
49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127434, Russia

³Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia
42 Karla Libknekhta st., Yekaterinburg, 620075, Russia

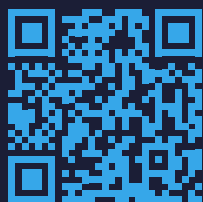
⁴Bashkir State Pedagogical University named after
Ml. Akmulla,
3A October Revolution st., Ufa, 450077, Russia

⁵Bashkir Scientific Research Institute of Agriculture is a
separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of
the Russian Academy of Sciences,
19 Rikhard Zorge st., Ufa, 450059, Russia

⁶Institute of Animal Husbandry and Pastures of the Tajik
Academy of Agricultural Sciences
17 Giprozem St., Dushanbe, 734001, Tajikistan



**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

УДК 633.174.1:631.527

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-76-82

О.П. Кибальник

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Россия

✉ kibalnik79@yandex.ru

Поступила в редакцию: 03.09.2025

Одобрена после рецензирования: 28.12.2025

Принята к публикации: 25.01.2026

© Кибальник О.П.

Изучение фенологических особенностей гибридов сахарного сорго на основе цитоплазмы А2 при возделывании в условиях Саратовской области

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Изучение фенологических особенностей новых сортов и гибридов сорго является важной частью селекционной работы, особенно в регионах северной зоны соргосеяния, где растения сахарного сорго произрастают в экстремальных условиях, характеризующихся в отдельные периоды вегетации недостатком суммы активных температур, количества световых часов, дефицитом осадков.

Цели исследований — оценить фенологические особенности гибридов сахарного сорго, полученных с использованием стерильной цитоплазмы А2 и выделить перспективные комбинации для дальнейшего испытания в засушливых условиях Саратовской области.

Методы. Семь гибридов, полученных на основе ЦМС-линий со стерильной цитоплазмой А2, выращивали в течение 2022–2024 гг. на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Рос-сорго» и оценивали в соответствии с общепринятыми рекомендациями, методикой.

Результаты. Установлено, что продолжительность межфазных периодов и вегетационного периода в целом гибридов F_1 зависела как от складывающихся погодных условий в сезон выращивания растений, так и генотипических особенностей. Выявлены гибриды наиболее целесообразные для производства сочных кормов и сахаросодержащей продукции: с наименьшей амплитудой изменчивости продолжительности вегетационного периода за период испытания — А2 КВВ 114/к-10832 (116–118,7 сут.); разница составила 2,7 сут.; наиболее скороспелые — А2 Чайка/к-64 (101,0–111,3 сут.), А2 Чайка /к-581 (102,0–113,0 сут.).

Ключевые слова: сорго, ЦМС-линия, коллекционный сортообразец, гибрид, вегетационный период, межфазный период

Для цитирования: Кибальник О.П. Изучение фенологических особенностей гибридов сахарного сорго на основе цитоплазмы А2 при возделывании в условиях Саратовской области. *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 76–82. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-76-82>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-76-82

Oksana P. Kibalnik

Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russia

✉ kibalnik79@yandex.ru

Received by the editorial office: 03.09.2025

Accepted in revised: 28.12.2025

Accepted for publication: 25.01.2026

© Kibalnik O.P.

Study of the phenological characteristics of sugar sorghum hybrids based on A2 cytoplasm when cultivated in the Saratov region

ABSTRACT

Relevance. Studying the phenological characteristics of new sorghum varieties and hybrids is an important part of breeding work, especially in the northern sorghum-growing regions, where sugar sorghum plants grow in extreme conditions characterized by a lack of active temperature, light hours, and precipitation during certain periods of vegetation. *The purpose of the research* is to evaluate the phenological characteristics of sugar sorghum hybrids obtained using sterile A2 cytoplasm and identify promising combinations for further testing in arid conditions of the Saratov region.

Methods. Seven hybrids obtained on the basis of CMS lines with sterile A2 cytoplasm were grown during 2022–2024 at the experimental field of Institute “Rossorgo” and evaluated in accordance with generally accepted recommendations and methods.

Results. It was found that the duration of interphase periods and the growing season in general for F_1 hybrids depended both on the prevailing weather conditions during the growing season and on the genotypic characteristics. The hybrids that are most suitable for the production of succulent fodder and sugar-containing products have been identified: A2 KVV 114/k-10832 (116–118.7 days) has the lowest variability in the duration of the growing season during the test period, with a difference of 2.7 days; the most precocious hybrids are A2 Chaika/k-64 (101.0–111.3 days) and A2 Chaika/k-581 (102.0–113.0 days).

Key words: sorghum, CMS line, collection variety, hybrid, vegetation period, interphase period

For citation: Kibalnik O.P. Study of the phenological characteristics of sugar sorghum hybrids based on A2 cytoplasm when cultivated in the Saratov region. *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 76–82 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-76-82>

Введение/Introduction

Сорго сахарное — это культура многоцелевого назначения, обладающая большим разнообразием генотипов и широкой адаптацией к различным условиям выращивания [1, 2]. Так, среди сортов и гибридов можно выделить формы, приспособленные к возделыванию в умеренном или тропическом климате, большим или малым высотам над уровнем моря, заболоченным или засушливым условиям. Культура обеспечивает приемлемую урожайность при низком плодородии почв и уровне внесения удобрений по сравнению с традиционными культурами в стрессовых условиях возделывания [3]. Растительное сырье из данной культуры находит применение для производства продуктов питания, кормов и получения альтернативных возобновляемых источников энергии [4–6].

Сорго представляет собой типичное растение короткого дня, в связи с чем при интродукции в регионы с продолжительным световым днем отдельные генотипы утрачивают способность к цветению либо существенно замедляют свое фенологическое развитие. Данное свойство ограничивает использование таких образцов в селекционных программах [7]. При этом установлено, что сорго тропического происхождения проявляет большую чувствительность к фотопериоду по сравнению с формами, селекционированными в условиях умеренного климата [8, 9].

Важнейшим селекционным признаком культуры выступает продолжительность вегетационного периода. Позднеспелые образцы в основных зернопроизводящих регионах Российской Федерации, как правило, не успевают достигать полной спелости и формировать качественное зерно [10].

Длительность вегетационного периода детерминирована биологическими особенностями генотипа, складывающимися агроклиматическими условиями и определяется скоростью прохождения ключевых этапов органогенеза. В связи с этим в селекционной практике особое внимание уделяется изучению динамики прохождения основных фенологических фаз у растений сорго.

В современном сельскохозяйственном производстве отмечается устойчивая тенденция к расширению посевов гибридов первого поколения (F₁) сорго, в том числе сахарного подвида. Известно, что гибриды обладают повышенной продуктивностью по сравнению с сортами, что обусловлено проявлением гетерозиса по ряду хозяйственно ценных признаков [10–12].

Создание гибридных форм стало возможным благодаря использованию в качестве материнского компонента линий с цитоплазматической мужской стерильностью (ЦМС). Несмотря на выявление у культуры нескольких типов стерильности, все гибриды сахарного сорго, допущенные к

возделыванию на территории РФ, созданы на основе цитоплазматического типа А1 [13].

Ограниченное генетическое разнообразие источников ЦМС повышает риски массовой уязвимости гибридов к патогенам, вредителям и абиотическим стрессам. В связи с этим актуальной задачей современной селекции является вовлечение в гибридизацию альтернативных источников стерильности, таких как цитоплазма А2.

Цели исследований — оценить фенологические особенности гибридов сахарного сорго, полученных с использованием стерильной цитоплазмы А2 и выделить перспективные комбинации для дальнейшего испытания в засушливых условиях Саратовской области.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Объектами исследований являются родительские формы и гибриды сорго. Гибриды F₁ были получены на основе ЦМС-линий А2 КВВ 114, А2 Чайка; в качестве отцовских форм в скрещивание вовлекались сортообразцы из коллекции ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова»», являющиеся донорами следующих селекционно-ценных признаков: к-54 отличается по высоте растений (206,6–208,2 см), площади наибольшего листа (233,9–302,8 см²), длине соцветия (22,5–24,1 см), урожайности биомассы (17,18–23,63 т/га); к-64 — площади наибольшего и флагового листьев (203,2–267,7 см² и 121,7–164,1 см² соответственно), размерам соцветия (длина 23,4 см, ширина 17,2 см), урожайности биомассы (22,76–23,68 т/га); к-581 — урожайности биомассы (до 22,09 т/га); к-5529 — площади наибольшего листа (219,3 см²), длине соцветия (23,3 см); к-10832 — площади наибольшего и флагового листьев (253,9–377,8 см² и 114,2–261,2 см² соответственно), длине соцветия (22,3–31,7 см), урожайности биомассы (25,83–26,25 т/га).

Всего в течение 2022–2024 гг. на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», территориально расположенном в г. Саратове Саратовской области, проходили испытания 7 гибридов сахарного сорго. В качестве стандартов использовали 2 районированных по Нижневолжскому региону РФ сорта — Волжское 51 и Флагман¹.

Агротехника выращивания — зональная, разработана для возделывания в Нижнем Поволжье². Предшественник — черный пар. Весной перед посевом по мере созревания почвы участок бороновали в два следа, до посева проводили две культивации. Посев экспериментальных гибридов сахарного сорго и сортов-стандартов проведен 18–19 мая селекционной кассетной сеялкой СКС-6-10 (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Россия)

¹ Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Сорта растений (официальное издание). М.: Росинформагротех. 2025; 1: 631.

² Горбунов В.С. и др. Приемы повышения эффективности возделывания и переработки продукции сахарного сорго на кормовые и технические цели в условиях Нижнего Поволжья: рекомендации. Саратов: Орион. 2009; 31.

широкорядным способом с шириной междурядий 70 см. Закладка делянок осуществлена согласно рекомендациям А.Н. Шепеля³.

Площадь делянок в питомниках гибридном питомнике составила 7,7 м².

Повторность трехкратная, размещение рендомизированное.

Густоту стояния растений корректировали вручную — 100–150 тыс. раст/га.

По мере отрастания сорняков междурядья культивировали.

Фенологические наблюдения включали фиксирование следующих фаз вегетации: всходы, выметывание, цветение и созревание⁴.

Обработка экспериментальных данных выполнена методом дисперсионного однофакторного анализа с помощью программы «Агрос 2.09»⁵.

Климатические условия в период проведения эксперимента существенно различались, что позволило полноценно оценить реакцию гибридов на факторы внешней среды по продолжительности вегетационного периода. Сумма активных температур изменялась в интервале 2516–2557 °С, а количество осадков — 176,2–189,2 мм. Так, 2022 и 2024 годы характеризовались достаточной влагообеспеченностью для Саратовской области: гидротермический коэффициент (ГТК) составил 0,75 и 0,83 соответственно, тогда как в 2023 году сложились более засушливые условия и ГТК на уровне 0,69⁶. Особенность сезона 2022 г. — выпадение 73,5 мм осадков в июле, 2023 г. и 2024 г. — 59,3 мм и 56,0 мм в июне соответственно. В 2024 году среднемесячные показатели температуры воздуха в июне, июле, сентябре были выше на 2,1–2,6 °С, а в августе остались на уровне среднемноголетних данных.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Учитывая теплообеспеченность Саратовской области, селекцию сорго важно вести на скороспелость, чтобы образцы достигали полной спелости, особенно это условие необходимо для семеноводства родительских форм гибридов. Как отмечают исследователи, между продолжительностью вегетационного периода и продуктивностью существует корреляционная взаимосвязь [14]. Поэтому создавать новые скороспелые

и высокопродуктивные сорта и гибриды достаточно сложно. Поиску доноров скороспелости способствует изучение сортообразцов из коллекции генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, различающихся по происхождению, фенологическим и морфометрическим признакам [15].

В данную схему скрещиваний были включены и коллекционные сортообразцы, ежегодно вызревающие в условиях региона: к-64, к-10832, к-54, к-5529, к-581. В 2022 году период от посева до всходов составил 22,7–23,0 сут., в 2023-м он сократился до 13,7–15,7 (табл. 1). В среднем за два года исследований продолжительность периода «посев — всходы» показал значение 18,2–19,3 сут. (рис. 1А).

Дисперсионный анализ показал отсутствие значимых различий между гибридами по данному признаку как в среднем за два года, так и в каждый год исследований. Продолжительность периода признака «всходы — выметывание» в 2022 году составила 50,7–67,7 сут., в 2023 г. она увеличилась — 55,3–75,0 сут. (табл. 1). В среднем за два года исследований продолжительность периода «всходы — выметывание» варьировала в пределах 53,0–71,3 сут. Продолжительность данного периода у гибридов А2 КВВ 114/к-64 и А2 Чайка/к-64 в среднем за два года оказалась меньше по сравнению со стандартами — 53,0–54,5 против 55,3–56,3 сут. соответственно. Гибриды первого поколения А2 КВВ 114/к-10832 и 2 КВВ 114/к-54 значительно уступили стандартам: период «всходы — выметывание» достигал 65,2–71,3 сут. (рис. 1Б).

Период цветения у сорго считается критическим в развитии растений. Фаза цветения у сортов Волжское 51 и Флагман наступала через 63,8–64,8 сут. после всходов в среднем за 2022–2023 гг. У гибридов этот показатель варьировал в пределах 65,5–76,8 сут. (рис. 1В). На уровне стандартов оказались только два гибрида, у которых в качестве отцовской формы включали коллекционный сортообразец к-64. У гибридов на основе А2 КВВ 114 с образцами к-54 и к-10832 отмечен наибольший изучаемый период — 72,7–76,8 сут. Вместе с тем продолжительность периода в среднем по образцам в 2022 г. составила 69,1 сут., в 2023-м — 67,8 сут. при варьировании показателей 62,0–76,7 сут. и 65,3–78,0 сут. соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Продолжительность межфазных периодов гибридов F1 (сут.), 2022–2023 гг.

Table 1. Duration of interphase periods of F1 hybrids (days), 2022–2023

Гибрид, сорт	Посев — всходы		Всходы — выметывание		Всходы — цветение		Всходы — созревание	
	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Волжское 51(st)	23,0	14,7	56,0 с	56,7 а, b, c	64,0 b	65,7 а, b	107,0 b	113,7 b
Флагман(st)	23,0	15,7	54,0 b	56,7 а, b	62,0 а	65,7 а	103,0 а	113,7 b
А2 КВВ 114/к-64	22,7	14,3	50,7 а	58,3 с	65,7 с	67,3 b, c, d	107,7 b, c	114,3 b
А2 КВВ 114/к-10832	22,7	14,0	67,7 g, h	75,0 f	76,7 f, g	78,0 e	118,7 g, h	116,0 d

³ Шепель Н.А. Селекция и семеноводство гибридного сорго. Ростов-на-Дону: Ростовский университет. 1985; 256.

⁴ Куперман Ф.М. Биология развития культурных растений. М.: Высшая школа. 1982; 343.

⁵ Мартынов С.П. Статистический и биометрико-генетический анализ в растениеводстве и селекции. Пакет программ Agros 2.09. Тверь, 1999.

⁶ По данным химико-аналитической лаборатории ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока». Саратов.

Таблица 1. Продолжение

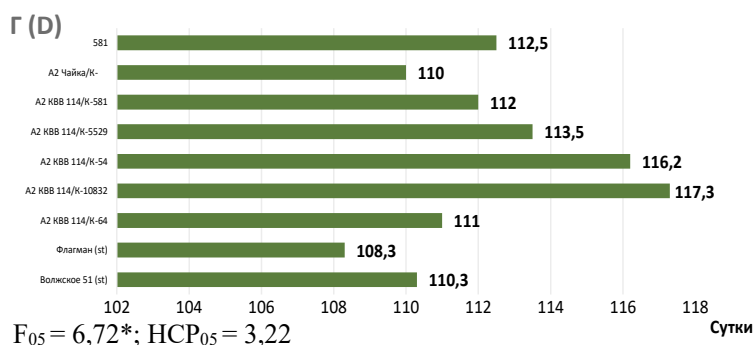
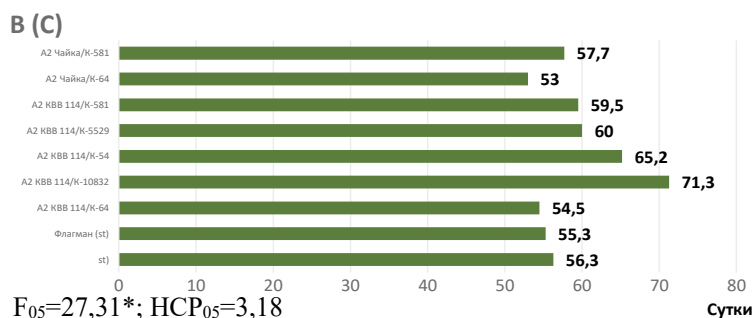
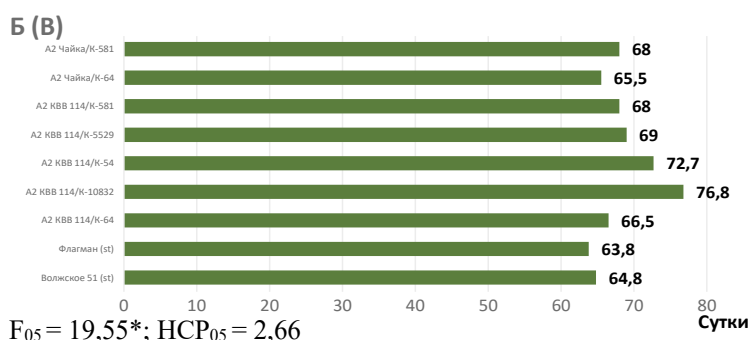
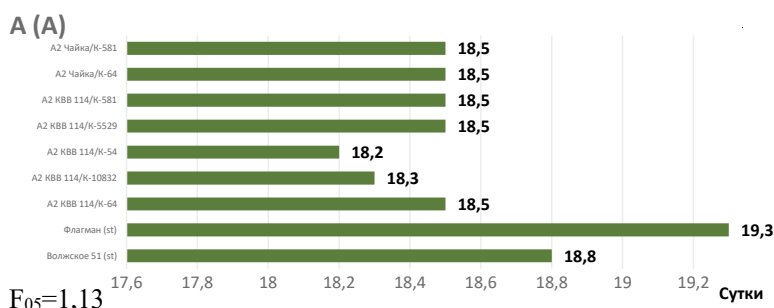
Гибрид, сорт	Посев — всходы		Всходы — выметывание		Всходы — цветение		Всходы — созревание	
	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
A2 KBB 114/к-54	22,7	13,7	67,7 h	62,7 e	76,7 g	68,7 d	118,7 h	113,7 b
A2 KBB 114/к-5529	23,0	14,0	60,0 e	60,0 d	70,0 d, e	68,0 c, d	111,0 ef	116,0 c, d
A2 KBB 114/к-581	22,7	14,3	61,7 f	57,3 bc	70,7 e	65,3 a	110,7 d, e	113,3 b
A2 Чайка/к-64	22,7	14,3	50,7 a	55,3 a	65,7 c	65,3 a	108,7 c	111,3 a
A2 Чайка/к-581	23,0	14,0	59,3 d, e	56,0 a, b	70,0 e	66,0 a, b	112,0 f	113,0 b
Среднее	22,8	14,3	58,6	59,8	69,1	67,8	110,8	113,9
F ₀₅	0,20	1,22	347,28*	137,97*	88,50*	59,28*	177,35*	7,72*
HCP ₀₅	—	—	1,03	1,57	1,67	1,57	1,17	1,57

Примечание: * $p \leq 0,05$. Данные, обозначенные разными буквами, достоверно различаются между собой в соответствии с тестом множественных сравнений Дункана при $p \leq 0,05$.

Рис. 1. Продолжительность межфазных периодов (среднее за 2022–2023 гг.): А) «посев — всходы»; Б) «всходы — выметывание»; В) «всходы — цветение»; Г) «всходы — созревание»

Fig. 1. Duration of interphase periods (average for 2022–2023): A) “sowing — sprouting”; B) “sprouting — threshing”; C) “sprouting — flowering”; D) “sprouting — ripening”

Примечание: * $p \leq 0,05$.



Созревание сортов и гибридов сорго зафиксировано через 103,0–112,0 сут. после всходов в условиях 2022 г., тогда как в 2023-м этот интервал составил 111,3–116,0 сут. При этом в среднем по изучаемым образцам разница между продолжительностью периода «всходы — созревание» в разные по гидротермическим условиям годы исследований оказалась более 3 суток (табл. 1). В среднем за период двухлетних испытаний выявлена изменчивость показателей экспериментальных гибридов по сравнению с сортами-стандартами — от 108,3 до 117,3 сут. (рис. 1Г).

Исследования показали, что все гибриды уступили сорту Флагман по данному признаку. Только 2 комбинации (A2 KBB 114/к-10832 и A2 KBB 114/к-54) оказались с более продолжительным вегетационным периодом по сравнению с сортом Волжское 51.

Для использования сорго на кормовые цели предпочтение следует отдавать более скороспелым формам. У большинства комбинаций проявился эффект гетерозиса позднеспелости, характерный для гибридов сорго [11].

Литературные данные указывают на то, что гетерозис по продолжительности межфазных периодов может как проявляется в диапазоне 10–16%, так и в отдельных комбинациях отсутствовать [10–12]. Так, в среднем за 2022–2023 гг. позднеспелость по сравнению со стандартами проявилась по периоду «всходы — выметывание» у гибридов на основе A2 KBB 114 с образцами к-5529, к-54, к-10832, «всходы — цветение» — у всех, кроме гибридов с образцом к-64, «всходы — созревание» — у гибридов на основе A2 KBB 114 с образцами к-54 и к-10832.

Гибриды первого поколения А2 Чайка / к-64 и А2 Чайка / к-581 оказались скороспелее стандартов в фазу выметывания, тогда как в фазу цветения и созревания — на уровне районированных сортов. По итогам двухлетних испытаний было продолжено изучение комбинаций А2 Чайка / к-64 и А2 Чайка / к-581 в 2024 г. (рис. 2).

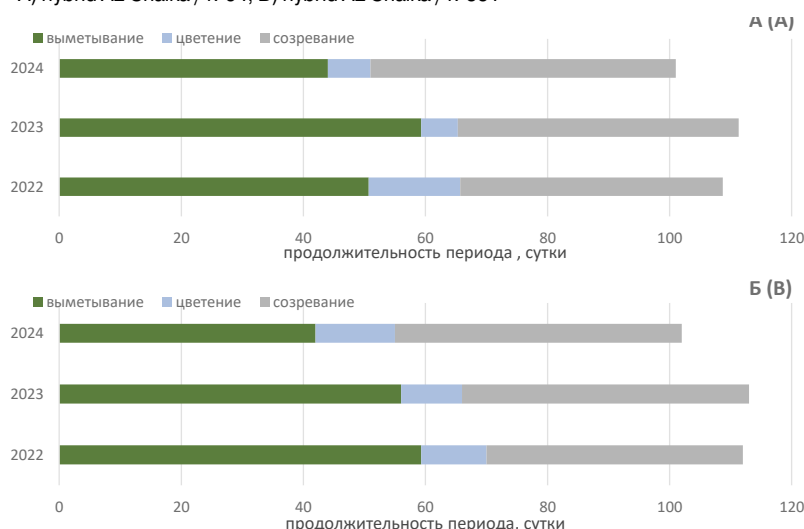
В условиях 2024 г. гибриды достигли созревания за 101,0–102,0 сут. В основном у гибридов сократился межфазный период от всходов до выметывания: у комбинации А2 Чайка / к-64 на 6,7–15,3 сут., А2 Чайка / к-581 — на 14,0–17,3 сут. по сравнению с показателями 2022–2023 гг. Очевидно, уменьшение межфазного периода связано с реакцией растений на повышение температуры воздуха в начальный период развития по сравнению со среднемноголетними данными. В среднем за трехлетний период вегетационный период составил 107–109 сут. Таким образом, выделенные гибриды целесообразны для выращивания в Саратовской области.

Как показали проведенные исследования, на продолжительность вегетационного периода гибридов F_1 влияние оказали как климатические условия в сезон выращивания растений, так и генотипические особенности. В то же время в литературных источниках установлено, что концентрация и накопление сахаров имеют практически линейную зависимость с продолжительностью периода «всходы — цветение» и вегетационного периода в целом, а также с суммой активных температур в рассматриваемый промежуток времени [16–18].

Так, для производства сахаросодержащей продукции лучше подходят высокорослые гибриды с продолжительным периодом вегетации и толстым стеблем [16, 17]. Предыдущие исследования показали, что для перерабатывающей промышленности лучше подходит высокорослый и

Рис. 2. Продолжительность межфазных периодов скороспелых гибридов (2022–2024 гг.): А) гибрид А2 Чайка / к-64; Б) гибрид А2 Чайка / к-581

Fig. 2. Duration of interphase periods of early-maturing hybrids (2022–2024): А) hybrid А2 Chaika / к-64; Б) hybrid А2 Chaika / к-581



продуктивный гибрид А2 КВВ 114 / к-10832 [19]. Данный гибрид характеризуется незначительной изменчивостью продолжительности вегетационного периода за 2022–2023 гг. — 116,0–118,7 сут.

Выводы/Conclusions

Представленные исследования показали, что, несмотря на проявление позднеспелости по сравнению с сортами-стандартами, все тестируемые гибриды вызревали в условиях региона.

За период испытания новых гибридов сахарного сорго оказалось, что наиболее стабильный период вегетации за исследуемый период отмечен у А2 Чайка / к-581, А2 Чайка / к-64, А2 КВВ 114 / к-10832. Так, разница по продолжительности периода «всходы — созревание» у гибрида А2 КВВ 114 / к-10832 составила 2,7 сут. У гибридов на основе ЦМС-линий А2 Чайка с опылителями к-64 и к-581 раньше других наступало созревание: через 107,0 и 109,0 сут. в среднем за 2022–2024 гг. соответственно.

Гибридные комбинации на основе ЦМС-линий наиболее перспективны для использования на различные цели в условиях выращивания Саратовской области.

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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках тематического плана ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы» согласно госзаданию № 1022051600013-1 и 124020300044-6 Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

FINANCING

The work was carried out within the framework of the thematic plan of the Federal State Budgetary Institution "Russian Scientific Research and Design Technological Institute of Sorghum and Corn" according to the state assignment No. 1022051600013-1 and 124020300044-6 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xue X. *et al.* Sugar accumulation enhancement in sorghum stem is associated with reduced reproductive sink strength and increased phloem unloading activity. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1233813. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1233813>

REFERENCES

1. Xue X. *et al.* Sugar accumulation enhancement in sorghum stem is associated with reduced reproductive sink strength and increased phloem unloading activity. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1233813. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1233813>

2. Baiseitova G., Moraru G., Sarsenbayev B., Kirshibayev E., Kenenbayev S. Biological Characteristics and Productivity of Sweet Sorghum Varieties in the Arid Conditions of Southeastern Kazakhstan. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2021; 21(2): 245–252. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2021.245.252>
3. Turp G.A., Celebi A., Ozdemir S. Enhancing energy potential of sweet sorghum by biomass ash compost in the context of climate change and agroecosystem. *Industrial Crops and Products*. 2023; 199: 116776. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116776>
4. Tovignan T.K., Fonceka D., Ndoye I., Cisse N., Luquet D. The sowing date and post-flowering water status affect the sugar and grain production of photoperiodic, sweet sorghum through the regulation of sink size and leaf area dynamics. *Field Crops Research*. 2016; 192: 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.015>
5. Malabadi R.B., Kolkar K.P., Chalannavar R.K. Sweet sorghum for biofuel energy: grain sorghum for food and fodder-phytochemistry and health benefits. *International Journal of Innovation Scientific Research and Review*. 2022; 4(9): 3305–3323.
6. Dalton J. *et al.* Impact of Drought Stress on *Sorghum bicolor* Yield, Deconstruction, and Microbial Conversion Determined in a Feedstocks-to-Fuels Pipeline. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2024; 12(42): 15613–15622. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c05826>
7. Upadhyaya H.D., Vetriventhan M., Azevedo V.C.R. Variation for Photoperiod and Temperature Sensitivity in the Global Mini Core Collection of Sorghum. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 12: 571243. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.571243>
8. Kouressy M., Dingkuhn M., Vaksman M., Heinemann A.B. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008; 148(3): 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.009>
9. Каменева О.Б., Кибальник О.П. Генотипические различия образцов сахарного сорго коллекции ВИР. Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях аридизации климата. Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 35-летию ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». Саратов: Амирит. 2021; 137–143. EDN EDNVHT
10. Ковтунова Н.А., Володин А.Б., Ковтунов В.В. Гетерозис в селекции сахарного сорго. *Зерновое хозяйство России*. 2017; (1): 11–17. EDN YGUJOL
11. Володин А.Б., Капустин С.И., Капустин А.С. Схема селекции и уровень гетерозиса гибридов сорго сахарного. *Таврический вестник аграрной науки*. 2021; (1): 64–72. EDN NLDHJE
12. Kumar S., Srinivasa Rao P., Reddy B.V.S., Ravindrababu V., Reddy K.H.P. Heterosis and Inbreeding Depression in Tropical Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Crop Research*. 2016; 51(1). <https://doi.org/10.4172/2454-1761.1000104>
13. Кибальник О.П. Использование стерильной цитоплазмы A2 в селекции гибридов F1 сахарного сорго. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2024; 18(4): 16–28. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-16-28>
14. Романюкин А.Е., Шishova E.A., Ковтунова Н.А., Ермолина Г.М. Признаковая и генетическая коллекция скороспелых форм сахарного сорго. *Аграрный вестник Урала*. 2016; (7): 46–50. EDN WXA ZVD
15. Жукова М.П., Володин А.Б., Голуб А.С., Чухлебова Н.С., Донец И.А. Результаты селекции сорго на гетерозис. *Вестник АПК Ставрополья*. 2016; (4): 163–168. EDN XWYXVL
16. Regassa T.H., Wortmann C.S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. *Biomass and Bioenergy*. 2014; 64: 348–355. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052>
17. Audilakshmi S., Mall A.K., Swarnalatha M., Seetharama N. Inheritance of sugar concentration in stalk (brix), sucrose content, stalk and juice yield in sorghum. *Biomass and Bioenergy*. 2010; 34(6): 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.025>
18. Siddique A., Upadhyay H., Sharma M.K., Kumar A. Regulation of Sugar in Sweet Sorghum Crop — A Review. *Journal Pure and Applied Microbiology*. 2018; 12(1): 355–359. <https://doi.org/10.22207/JPAM.12.1.41>
19. Кибальник С.В., Кибальник О.П. Изучение гибридов F1 сорго на основе ЦМС типа A2 силосного направления использования. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2025; 42: 149–163. EDN OTDWFE
2. Baiseitova G., Moraru G., Sarsenbayev B., Kirshibayev E., Kenenbayev S. Biological Characteristics and Productivity of Sweet Sorghum Varieties in the Arid Conditions of Southeastern Kazakhstan. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2021; 21(2): 245–252. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2021.245.252>
3. Turp G.A., Celebi A., Ozdemir S. Enhancing energy potential of sweet sorghum by biomass ash compost in the context of climate change and agroecosystem. *Industrial Crops and Products*. 2023; 199: 116776. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116776>
4. Tovignan T.K., Fonceka D., Ndoye I., Cisse N., Luquet D. The sowing date and post-flowering water status affect the sugar and grain production of photoperiodic, sweet sorghum through the regulation of sink size and leaf area dynamics. *Field Crops Research*. 2016; 192: 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.015>
5. Malabadi R.B., Kolkar K.P., Chalannavar R.K. Sweet sorghum for biofuel energy: grain sorghum for food and fodder-phytochemistry and health benefits. *International Journal of Innovation Scientific Research and Review*. 2022; 4(9): 3305–3323.
6. Dalton J. *et al.* Impact of Drought Stress on *Sorghum bicolor* Yield, Deconstruction, and Microbial Conversion Determined in a Feedstocks-to-Fuels Pipeline. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2024; 12(42): 15613–15622. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c05826>
7. Upadhyaya H.D., Vetriventhan M., Azevedo V.C.R. Variation for Photoperiod and Temperature Sensitivity in the Global Mini Core Collection of Sorghum. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 12: 571243. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.571243>
8. Kouressy M., Dingkuhn M., Vaksman M., Heinemann A.B. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008; 148(3): 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.009>
9. Kamenева O.B., Kibalnik O.P. Genotypic differences of sugar sorghum samples from the vir collection. *Scientific support for sustainable development of the agro-industrial complex in the context of climate aridization. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 35th anniversary of the FSBI RusRDTI "Rossorgo"*. Saratov: Amirit. 2021; 137–143 (in Russian). EDN EDNVHT
10. Kovtunova N.A., Volodin A.B., and Kovtunov V.V. Heterosis in breeding of sweet sorghum. *Grain Economy of Russia*. 2017; (1): 11–17 (in Russian). EDN YGUJOL
11. Volodin A.B., Kapustin S.I., Kapustin A.S. Breeding scheme and heterosis level of sugar sorghum hybrids. *Taurida herald of the agrarian sciences*. 2021; (1): 64–72 (in Russian). EDN NLDHJE
12. Kumar S., Srinivasa Rao P., Reddy B.V.S., Ravindrababu V., Reddy K.H.P. Heterosis and Inbreeding Depression in Tropical Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Crop Research*. 2016; 51(1). <https://doi.org/10.4172/2454-1761.1000104>
13. Kibalnik O.P. Use of sterile A2 cytoplasm in the selection of F1 sugar sorghum hybrids. *Far Eastern Agricultural Journal*. 2024; 18(4): 16–28 (in Russian). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-16-28>
14. Romanukin A.E., Shishova E.A., Kovtunova N.A., Ermolina G.M. Trait and genetic collection of the early maturing forms of sweet sorghum. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2016; (7): 46–50 (in Russian). EDN WXA ZVD
15. Zhukova M.P., Volodin A.B., Golub A.S., Chukhlebova N.S., Donets I.A. The results of the breeding of sorghum on heterosis. *Agrarian Bulletin of Stavropol Region*. 2016; (4): 163–168 (in Russian). EDN XWYXVL
16. Regassa T.H., Wortmann C.S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. *Biomass and Bioenergy*. 2014; 64: 348–355. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052>
17. Audilakshmi S., Mall A.K., Swarnalatha M., Seetharama N. Inheritance of sugar concentration in stalk (brix), sucrose content, stalk and juice yield in sorghum. *Biomass and Bioenergy*. 2010; 34(6): 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.025>
18. Siddique A., Upadhyay H., Sharma M.K., Kumar A. Regulation of Sugar in Sweet Sorghum Crop — A Review. *Journal Pure and Applied Microbiology*. 2018; 12(1): 355–359. <https://doi.org/10.22207/JPAM.12.1.41>
19. Kibalnik S.V., Kibalnik O.P. The study of sorghum hybrids F1 based on CMS A2 type silage direction of use. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025; 42: 149–163 (in Russian). EDN OTDWFE

ОБ АВТОРАХ

Оксана Павловна Кибальник

доктор биологических наук, главный научный сотрудник

kibalnik79@yandex.ru<https://orcid.org/0000-0002-1808-8974>

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы,
1-й Институтский проезд, 4, Саратов, 410050, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Oksana Pavlovna Kibalnik

Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher

kibalnik79@yandex.ru<https://orcid.org/0000-0002-1808-8974>

Russian Research and Design-Technological Institute
of Sorghum and Corn,
4 1st Institute passage, Saratov, 410050, Russia

ПРО ЯБЛОКО

**ЗДЕСЬ ФОРМИРУЕТСЯ БУДУЩЕЕ
РОССИЙСКОГО САДОВОДСТВА**

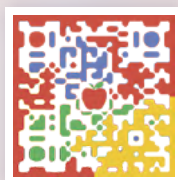
9-11 июня 2026

МВЦ «МинводоЭКСПО»

ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПОДРОБНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ
О ВЫСТАВКЕ >



УДК 633.174.1:631.527

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-83-90

Д.С. Семин ✉

И.Г. Ефремова

С.С. Куколева

В.И. Старчак

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы «Россорго», Саратов, Россия

✉ sds-balashov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 03.09.2025

Одобрена после рецензирования: 28.12.2025

Принята к публикации: 25.01.2026

© Семин Д.С., Ефремова И.Г.,
Куколева С.С., Старчак В.И.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-83-90

Dmitry S. Semin ✉

Irina G. Efremova

Svetlana S. Kukoleva

Viktoria I. Starchak

Russian Research and
Design-Technological Institute
of Sorghum and Corn "Rossorgo",
Saratov, Russia

✉ sds-balashov@yandex.ru

Received by the editorial office: 03.09.2025

Accepted in revised: 28.12.2025

Accepted for publication: 25.01.2026

© Semin D.S., Efremova I.G., Kukoleva S.S.,
Starchak V.I.

Селекция зернового сорго для повышения ассортимента зернофуражных культур в засушливых регионах России

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В связи с аридизацией климата во многих регионах России возделывание засухоустойчивых культур для различных отраслей кормопроизводства приобретает особую важность. Среди таких культур зерновое сорго с его уникальной засухоустойчивостью и универсальностью использования является важным компонентом кормов для сельскохозяйственных животных. Поэтому создание более совершенных сортов и гибридов зернового сорго с высокой продуктивностью зерна и биомассы отличается актуальностью.

Методы. Материалом исследований послужили 8 сортов, 3 продуктивные перспективные селекционные линии и гибрид зернового сорго. Исследования выполнены на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» 2021–2023 гг. В качестве стандарта использован районированный сорт зернового сорго Старт. Оценка хозяйственно ценных признаков проведена согласно методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур, а также общепринятых рекомендаций.

Результаты. Установлены ценные образцы, существенно превысившие сорт-стандарт Старт по величине морфометрических показателей и элементов продуктивности, что привело к увеличению их урожайности зерна и биомассы. Выделены 11 образцов с урожайностью зерна 4,40–6,63 т/га, превосходящих стандарт на 9,2–64,5%. Пять сортов и две линии Л-50/14 и Л-65/14 достоверно превысили стандарт по урожайности биомассы — на 27,9–57,9%, гибрид Тамараж — на 88,9%. Установлены семь образцов с наибольшей биоэнергетической ценностью зерна, особенно выделились линия Л-65/14 — 99,83 ГДж/га, сорт РСК Коралл — 108,40 ГДж/га и гибрид Тамараж — 122,46 ГДж/га, что выше стандарта на 31,6–61,5%. Новые высокоэнергетические сорта зернового сорго селекции Института «Россорго» включены в Госреестр селекционных достижений в 2019–2024 гг. и востребованы отечественными сельхозтоваропроизводителями.

Ключевые слова: зерновое сорго, селекционные показатели, урожайность зерна, урожайность биомассы, валовая энергия, ГТК, протеин, сорт-стандарт

Для цитирования: Семин Д.С., Ефремова И.Г., Куколева С.С., Старчак В.И. Селекция зернового сорго для повышения ассортимента зернофуражных культур в засушливых регионах России. *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 83–90.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-83-90>

Breeding grain sorghum to increase the range of grain forage crops in the arid regions of Russia

ABSTRACT

Relevance. Due to the aridization of the climate in many regions of Russia, the cultivation of drought-resistant crops for various feed production industries has become particularly important. Among these crops, grain sorghum, with its unique drought tolerance and versatility, is an essential component of animal feed. Therefore, the development of improved varieties and hybrids of grain sorghum with high grain and biomass productivity is highly relevant.

Methods. The research material included 8 varieties, 3 productive promising breeding lines, and a grain sorghum hybrid. The research was conducted at the experimental field of the Russian Research Institute of Sorghum and Corn 2021–2023. The standard was the regionally adapted grain sorghum variety Start. The evaluation of economic and valuable traits was conducted according to the methodology of state variety testing for agricultural crops and generally accepted recommendations.

Results. Valuable samples were identified that significantly exceeded the Start standard variety in terms of morphometric indicators and productivity elements, resulting in increased grain and biomass yields. Eleven samples with grain yields of 4.40–6.63 t/ha were selected, exceeding the standard by 9.2–64.5%. Five varieties and two lines, L-50/14 and L-65/14, significantly exceeded the standard in terms of biomass yield by 27.9–57.9%, while the Tamarazh hybrid exceeded the standard by 88.9%. Seven samples with the highest bioenergy value of grain were identified, with the L-65/14 line standing out at 99.83 GJ/ha, the RSK Korall variety at 108.40 GJ/ha, and the Tamarazh hybrid at 122.46 GJ/ha, which is 31.6–61.5% higher than the standard. New high-energy varieties of grain sorghum bred by the Rossorgo Institute were included in the State Register of Breeding Achievements in 2019–2024 and are in demand among domestic agricultural producers.

Key words: grain sorghum, selection indicators, grain yield, biomass yield, gross energy, GTC, protein

For citation: Semin D.S., Efremova I.G., Kukoleva S.S., Starchak V.I. Breeding grain sorghum to increase the range of grain forage crops in the arid regions of Russia. *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 83–90 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-83-90>

Введение/Introduction

Сорго занимает важное место в мировом сельском хозяйстве и отличается широким географическим распространением. Эта культура ценится за свою способность выдерживать засушливые условия и высокие температуры. Зерновое сорго возделывается примерно в 110 странах, в основном в Африке и Азии, а также в Америке, Европе и Океании, где преобладают регионы с ограниченным количеством осадков и жарким климатом [1, 2].

В условиях засушливого климата возникает необходимость использования засухоустойчивых культур в сельском хозяйстве, поэтому большое внимание необходимо уделять подбору засухоустойчивых культур. В частности, для производства кормов актуален подбор таких культур, как сорго, особенно в южных и юго-восточных регионах России, где засухи становятся всё более распространенными. Выращивание сорго в этих регионах способствует укреплению кормовой базы [3, 4].

Ключевыми участниками научно-исследовательской работы по селекции сорго в Российской Федерации являются ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», ФГБНУ «АНЦ «Донской», ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ», Поволжский НИИСС — филиал СамНЦ РАН и другие профильные научно-исследовательские организации [3–10]. Постоянный рост сельскохозяйственного производства требует систематической смены сортов и гибридов, улучшения их продуктивности и качества, сокращения сроков их выведения. Успешное увеличение посевных площадей требует выведения сортов и гибридов, которые характеризуются ранним сроком созревания, высокой продуктивностью, отличным качеством зерна и стабильной адаптацией к почвенно-климатическим условиям конкретной зоны выращивания.

Цель настоящих исследований — селекция зернового сорго для повышения ассортимента зернофуражных культур в засушливых регионах России.

Для выполнения данной цели решены задачи: сравнительный анализ селекционных линий, нового гетерозисного гибрида зернового сорго со стандартом и уже созданными сортами по основным хозяйственно ценным признакам, продуктивности, биоэнергетической ценности зерна и биомассы для представления на государственное сортоиспытание и их дальнейшее продвижение в производство.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Материал исследований представлен 8 сортами (Магистр, Бакалавр, Ассистент, РСК Каскад, РСК Коралл, РСК Кахолонг, Кулон, Принц), 3 селекционными линиями (Л-251/14, Л-50/14, Л-65/14) и гибридом Тамараж зернового сорго собственной селекции питомника конкурсного сортоизучения. Сорта включены в Госреестр селекционных достижений в 2019–2024 гг. с допуском использования в 6-м, 7-м, 8-м, 9-м регионах РФ (согласно Государственному реестру сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию)¹.

Перспективные линии проходят селекционную доработку, гибрид Тамараж с 2023 года находится на государственном сортоиспытании. Опыты выполнены на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в 2021–2023 гг. Площадь делянок в питомнике — 30,8 м², повторность трехкратная, густота стояния растений зернового сорго — 80–100 тыс. раст/га, посев широкорядный (ширина междурядий 0,7 м).

Селекционный материал оценивали по интенсивности стартового роста, высоте растений при созревании, параметрам наибольшего и флагового листа², длине соцветия, выдвинутости ножки соцветий, массе 1000 семян³ и зерна с одной метелки, а также урожайности зерна и биомассы, продуктивной кустистости. Оценка показателей проведена согласно методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур⁴, а также «Широкого унифицированного классификатора СЭВ и международного классификатора СЭВ возделываемых видов рода *Sorghum Moench*»⁵.

Биоэнергетическая оценка урожая зерна изученных образцов проведена по сравнению со стандартом (сортом Старт). С этой целью выполнено исследование зоотехнических показателей зерна (содержание сырого протеина, сырого жира, сырой клетчатки, БЭВ), которое осуществлялось на инфракрасном анализаторе Spectra Star XT модификации 2600 XT-1 (Unity Scientific, США) методом спектроскопии. Прибор откалиброван по содержанию изучаемых зоотехнических показателей (сырого протеина, сырой золы, сырого жира, сырой клетчатки, БЭВ растительных) согласно ГОСТ 10846-91⁶, ГОСТ 13496.15-2016⁷, ГОСТ 26226-95 (зола)⁸, ГОСТ 31675-2012⁹.

¹ Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений (официальное издание). М.: Росинформагротех. 2024; 632.

² Чирков Ю.И. Определение площади листьев расчетным методом. Москва. 1961; 5–6.

³ ГОСТ 12042-80 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения массы 1000 семян.

⁴ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Москва. 1989; 194.

⁵ Якушевский Е.С., Варадинов С.Г., Корнейчук В.А., Баняи Л. Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ возделываемых видов рода *Sorghum Moench*. Л. 1982; 34.

⁶ ГОСТ 10846-91. Межгосударственный стандарт. Метод определения белка. Зерно и продукты его переработки.

⁷ ГОСТ 13496.15-2016 Межгосударственный стандарт. Метод определения сырого жира. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье.

⁸ ГОСТ 26226-95 Межгосударственный стандарт. Метод определения сырой золы. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье.

⁹ ГОСТ 31675-2012 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации.

Расчет показателя валовой энергии (ВЭ) (МДж/кг сухого вещества зерна) произведен на основе данных химического анализа по формуле¹⁰:

$$ВЭ = 23,95 \times (\text{сырой протеин}) + 39,77 \times (\text{сырой жир}) + 20,05 \times (\text{сырая клетчатка}) + 17,46 \times (БЭВ).$$

Климат Саратовской области суровый континентальный. Для этой местности типичны частые засухи — как в почве, так и в воздухе. Температура и количество влаги в разные периоды сильно варьируют: среднегодовое количество осадков колеблется от 250 до 450 мм. Средняя температура воздуха за год составляет +4,8 °С [11]. Зимы могут быть суровыми — с абсолютными минимумами до -40 °С, зафиксированными в январе. Лето, напротив, бывает жарким — с максимальными температурами до +42 °С в июле и августе. Именно в июле отмечаются самые высокие среднесуточные температуры воздуха (21,0–21,7 °С) и максимальное количество выпавших осадков, достигающее 51 мм. За период вегетации сорговых культур в регионе доступно от 2400 до 3100 °С тепловых ресурсов.

Метеорологические условия периода исследований значительно отличались от среднепогодных показателей. Наблюдалась изменчивость гидротермических коэффициентов в течение рассматриваемого периода: в 2021 году показатель составил 0,62, в 2022-м — 0,75, в 2023-м — 0,69. Для статистической обработки полученных экспериментальных данных применяли программы AGROS 2.09¹¹, включая дисперсионный анализ и методы статистического анализа выборки¹².

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В проведенных исследованиях установлено существенное варьирование характеристик образцов. Так, вариация данных по высоте растений при созревании составляет 8,2%, а по выдвинутости ножки соцветия — 27,3%. Другие параметры показали вариацию значений признаков внутри этого интервала варьирования (табл. 1).

Среди сортов и линий зернового сорго выделены быстроразвивающиеся образцы, отличившиеся интенсивным начальным ростом, которые сформировали травостой через 30 дней после всходов высотой 50,2 см (РСК Каскад) — 52,1 см (линия Л-251/14), которые превысили по величине признака стандарт Старт на 7,5–11,6%. Биологическая особенность растений сорго быстро развиваться и

достигать в первый месяц вегетации значительной высоты является ценным свойством, способствующим успешной конкурентной борьбе с сорной растительностью.

По высоте созревших растений отмечено наименьшее варьирование величины признака (8,2%) при среднем значении высоты растений в питомнике 129,1 см. Выявлена и более низкорослая линия Л-50/14 — 112,80 см. Растения сортов Ассистент и Принц характеризовались большей высотой — 134,70 см и 139,5 см соответственно. В группе изученного селекционного материала наиболее высокорослым оказался гибрид Тамараж, достигший высоты растений в полную спелость зерна 157,3 см.

Лист — орган высшего растения, предназначенный для фотосинтеза, транспирации и газообмена, играет полифункциональную роль в поддержке жизнедеятельности, развитии и адаптации растительного организма [12]. В практике сельскохозяйственного производства оценка площади листьев необходима при прогнозировании урожайности, в селекционной работе показатель используется для оценки сортовых особенностей растений.

Исследователями проведен сравнительный анализ [13] классических и современных методик [14] определения площади листовой поверхности, в том числе расчетный метод, основанный на измерении линейных параметров листа с использованием поправочных коэффициентов, который для листьев сорговых культур составляет 0,746.

Показатель «площадь наибольшего листа» у образцов зернового сорго подвержен сильной

Таблица 1. Оценка варьирования морфометрических показателей и элементов продуктивности образцов зернового сорго при использовании статистического анализа параметров выборки, 2021–2023 гг.

Table 1. Evaluation of the variation of morphometric indicators and productivity elements of grain sorghum samples using statistical analysis of sample parameters, 2021–2023

Признак	Значение признака (min–max)	Средняя и ее ошибка	Коэффициент вариации V, (%)
Стартовый рост, см	33,0–52,1	43,73 ± 1,39	11,9
Высота растений при созревании, см	112,8–157,3	129,11 ± 2,84	8,2
Площадь наибольшего листа, см ²	123,0–258,0	183,45 ± 12,65	24,9
Площадь флагового листа, см ²	72,3–282,0	100,68 ± 5,28	18,9
Выдвинутость ножки метелки, см	12,70–32,1	19,76 ± 1,44	27,3
Длина соцветия, см	17,6–26,10	22,66 ± 0,69	11,4
Масса зерна с одной метелки, г	14,4–36,5	21,42 ± 1,38	24,1
Масса 1000 семян, г	24,3–34,7	30,22 ± 0,78	9,6
Урожайность семян, т/га	4,03–6,63	5,01 ± 0,23	17,1
Урожайность биомассы, т/га	14,62–27,62	18,89 ± 0,61	11,6
Кустиность продуктивная, шт/раст	1,37–2,31	1,63 ± 0,06	14,8

¹⁰ Григорьев Н.Г., Скоробогатых Н.Н., Косолапов В.М. Оценка качества кормов по обменной энергии. Кормопроизводство. 2008; 9: 21–22.

¹¹ Мартынов С.П. Статистический и биометрико-генетический анализ в растениеводстве и селекции. Пакет программ AGROS 2.09. Тверь, 1999.

¹² Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс. 2014; 351.

изменчивости, коэффициент вариации равен $V = 24,9\%$. Варьирование показателя находилось в пределах 123,0–258,0 см², средняя величина в питомнике составила 183,4 см².

В питомнике установлены сорта с самой значительной площадью наибольшего листа (РСК Коралл — 255,1 см², РСК Кахолонг — 246,5 см², Принц — 258,0 см²), превосходящие стандарт Старт на 96,2–109,7%. Гибрид Тамараж отличился самой большой площадью наибольшего листа — 503,6 см², которая превзошла стандарт в три раза.

Площадь флагового листа у стандарта составила 72,3 см². В питомнике отмечены сорта и линии с величиной признака на его уровне, однако выявлены образцы, существенно превосходящие стандарт по величине показателя: Ассистент — 113,9 см², РСК Коралл — 113,0 см², РСК Кахолонг — 126,8 см², Принц — 113,7 см², линия Л-50/14 — 112,4 см², которые превысили стандарт на 55,5–75,4%, а гибрид Тамараж почти в три раза (табл. 2).

Оценен параметр соцветий образцов — выдвинутость ножки метелки, показавший высокую изменчивость признака в пределах 12,70–32,1 см, коэффициент вариации составил 27,3%. Наибольшая величина показателя выявлена у стандарта Старт — 32,1 см, близким к нему оказался сорт Кулон — 25,7 см. Длина соцветий образцов питомника проявила меньшую изменчивость (17,6–26,1 см) с коэффициентом вариации 11,4%. В питомнике многие образцы оказались на уровне стандарта по величине признака.

Выявлена значительная изменчивость массы зерна с метелки: 14,4–36,5 г при коэффициенте вариации 24,1%. Урожайность зерна с метелки сорта-стандарта составила 14,4 г. Дисперсионный анализ показал существенное превышение массы зерна с метелки ряда образцов при сравнении со стандартом: РСК Каскад (24,3 г), Магистр (21,5 г), РСК Коралл (23,7 г), РСК Кахолонг (24,4 г), Л-251/14 (21,4 г), Л-65/14 (21,2 г) — на 47,2–68,8%, у гибрида Тамараж — 153,5% к стандарту.

В среднем за годы исследований масса 1000 семян образцов не претерпела сильной изменчивости по величине признака 24,3–34,7 г, средняя составила 30,2 г, коэффициент вариации — 9,6%. Селекционеры уделяют достаточное внимание повышению крупности зерновок — массы 1000 семян, так как продуктивность сорго формируется в результате взаимодействия окружающей среды и генетических особенностей растения.

Масса семян является экономически значимой характеристикой, поскольку облегчает стандартизацию дозирования при посеве. Крупные семена характеризуются повышенным выходом сухого вещества, а также более высоким содержанием белка и крахмала по сравнению с мелкими.

Установлена корреляционная связь между размером семян и такими агрономически важными признаками, как всхожесть, устойчивость к полеганию [15]. Новый сорт Ассистент превзошел стандарт по массе 1000 семян, достигнув 34,7 г, у стандарта этот показатель составил 31,0 г.

Таблица 2. Оценка продуктивных сортов, линий, гибрида зернового сорго по морфометрическим показателям и элементам продуктивности, 2021–2023 гг.

Table 2. Evaluation of productive varieties, lines, and hybrid of grain sorghum on morphometric indicators and productivity elements, 2021–2023

Образцы	Высота растений, см		Площадь листа, см ²		Параметры соцветия, см		Масса, г		Урожайность, т/га		Продуктивная кустистость, шт.
	через 30 дн. от всходов	при созревании	наибольшего	флагового	выдвинутость ножки	длина	зерна с одной метелки	1000 зерен	зерна	биомассы	
Старт St.	46,7	121,3	123,0	72,3	32,1	22,5	14,4	31,0	4,03	14,62	2,31
Магистр	39,9	121,5	179,0	96,8	18,3	17,6	21,5	33,6	5,00	18,70	1,51
Бакалавр	47,2	130,9	142,7	75,6	20,4	25,2	17,4	32,9	4,12	19,22	1,82
Ассистент	44,4	134,7	188,9	113,9	22,3	25,6	17,6	34,7	4,40	17,18	1,61
РСК Каскад	50,2	128,9	164,9	102,9	24,2	22,6	24,3	30,7	5,01	20,72	1,38
РСК Коралл	42,1	122,5	255,1	113,0	13,7	23,9	23,7	26,6	5,76	20,65	1,47
РСК Кахолонг	41,8	119,2	246,5	126,8	15,3	25,3	24,4	24,3	5,20	19,20	1,50
Кулон	40,8	129,9	134,2	82,1	25,7	20,9	18,9	28,6	4,47	18,17	1,68
Принц	33,0	149,5	258,0	113,7	18,4	21,7	18,9	26,5	4,75	19,08	1,37
Л-251/14	52,1	127,8	152,1	78,5	20,7	19,3	21,4	31,4	4,72	15,69	1,50
Л-50/14	46,1	112,8	156,8	112,4	12,7	24,6	19,5	32,1	4,86	20,24	1,55
Л-65/14	44,5	129,9	179,2	93,67	22,4	21,3	21,2	30,7	5,35	18,97	1,82
Тамараж	36,3	157,3	503,6	282,0	13,6	20,6	36,5	30,2	6,63	27,62	1,62
F _{факт}	2,80*	6,08*	6,53*	4,24*	7,60*	3,60*	3,11*	6,50*	3,59*	2,51*	2,87*
НСР ₀₅	11,87	10,40	50,67	31,75	5,37	4,49	6,86	3,76	0,40	4,26	0,64

Большинство сортов и линий характеризовались крупностью семян на уровне стандарта: Бакалавр — 32,9 г, РСК Каскад — 30,7 г, Магистр — 33,6 г, Кулон — 28,6 г, Л-50/14 — 32,1 г, Л-251/14 — 31,4 г, Л-65/14 — 30,7 г, так же как и Тамараж — 30,2 г.

Установлено среднее варьирование урожайности семян образцов за три года исследований — от 4,03 до 6,63 т/га, средняя величина при этом составила 5,01 т/га, коэффициент вариации — 17,1% (табл. 1). Сравнение зерновой продуктивности образцов за изучаемый период со стандартом Старт (урожайность зерна 4,03 т/га) позволило выделить 11 образцов с урожайностью зерна 4,40–6,63 т/га, превосходящих его на 9,2–64,5% (табл. 2). Наиболее ценные продуктивные образцы сформировали урожайность зерна выше 5,0 т/га: сорта РСК Каскад — 5,01 т/га, РСК Коралл — 5,76 т/га, РСК Кахолонг — 5,20 т/га, линия Л-65/14 — 5,35 т/га, гибрид Тамараж — 6,63 т/га.

Выявлена средняя изменчивость урожайности биомассы образцов — варьирование составило 14,62–27,62 т/га. Сравнение урожайности биомассы стандарта Старт (14,62 т/га) с другими образцами питомника дало возможность выделить пять сортов (РСК Каскад, Бакалавр, РСК Коралл, РСК Кахолонг, Принц), две линии Л-50/14, Л-65/14 и гибрид Тамараж, достоверно превышающих стандарт по величине признака на 27,9–88,9%.

Продуктивная кустистость сортов и линий зернового сорго в питомнике варьировала в пределах 1,37–2,31 шт. побег/раст со средней кустистостью 1,63 шт/раст, коэффициент вариации составил 14,8%. Растения сорта-стандарта Старт характеризовались величиной продуктивной кустистости 2,31 шт. побег/раст. Другие сорта и линии питомника отличились достоверно меньшей продуктивной кустистостью: 1,37 шт. побег/раст (сорт Принц) — 1,82 шт. побег/раст (сорт Бакалавр и линия Л-65/14).

Для использования продукции сорго на семена, зерно, зернофураж наилучшие результаты комбайновой уборки напрямую получают посеvy слабостебельных форм, поскольку на побегах кущения формируются зерновки позже, повышенной влажности и недозревшие, что увеличивает влажность убранного зерна и снижает его качество. Новый гибрид зернового сорго Тамараж сформировал посеvy со средней продуктивной кустистостью — 1,62 шт. побег/раст.

Биоэнергетическая ценность зерна изученных образцов зернового сорго

Изученные образцы оценены по содержанию питательных компонентов семян (сырого протеина, жира, золы, клетчатки, безазотистых экстрактивных веществ, БЭВ) с целью определения содержания валовой энергии в 1 кг зерна с последующим анализом выхода валовой энергии с урожаем зерна сортов, линий и гибрида (табл. 3).

Содержание сырого протеина в зерне образцов варьировало в пределах 9,26% у гибрида Тамараж до 11,17% у сорта Бакалавр. По содержанию сырого протеина существенно (10,61%) превысил стандарт лишь сорт Бакалавр, другие образцы оказались на его уровне по величине показателя.

По содержанию сырого жира в зерне установлена меньшая изменчивость: 2,96% (Кулон) — 4,08% (Л-50/14) при значении признака у стандарта 3,91%. Наибольший показатель выявлен у линии Л-50/14 — 4,08%. Концентрация сырой золы варьировала от 1,04% у линии Л-50/14 до 1,95% у гибрида Тамараж. По содержанию сырой золы достоверно превысили стандарт (1,34%) образцы: сорта РСК Каскад — 1,43%, Кулон — 1,48%, линия Л-65/14 — 1,55%, гибрид Тамараж — 1,95%.

Содержание сырой клетчатки варьировало от 0,75% (Кулон) до 1,89% (Тамараж). Достоверное превышение показателя по сравнению со стандартом (1,35%) установлено у образцов

Таблица 3. Сравнительная оценка компонентов биохимического состава зерна, выхода валовой энергии в урожае зерна образцов, 2021–2023 гг.

Table 3. Comparative assessment of the components of the biochemical composition of grain, the yield of gross energy in the samples, 2021–2023

Образец	Содержание в зерне стандартной влажности хранения (13,5% влаги), %					Урожайность зерна, т/га	Валовая энергия в 1 кг зерна, МДж	Выход валовой энергии зерна, ГДж/га
	протеин	жир	зола	клетчатка	БЭВ			
Старт St.	10,61	3,91	1,34	1,35	82,79	4,03	18,82	75,84
Магистр	9,97	3,92	1,35	1,16	83,60	5,00	18,78	93,90
Бакалавр	11,17	3,66	1,15	1,12	82,90	4,12	18,83	77,58
Ассистент	10,59	3,63	1,24	1,42	83,12	4,40	18,78	82,63
РСК Каскад	9,92	3,43	1,43	1,40	83,82	5,01	18,66	93,49
РСК Коралл	10,36	3,81	1,12	1,28	83,43	5,76	18,82	108,40
РСК Кахолонг	10,24	3,82	1,04	1,57	83,33	5,20	18,84	97,96
Кулон	9,64	2,96	1,48	0,75	85,17	4,47	18,51	82,74
Принц	10,34	3,51	1,36	1,33	83,46	4,75	18,71	88,87
Л-251/14	10,57	3,82	1,30	1,19	83,12	4,72	18,80	88,74
Л-50/14	10,32	4,08	1,04	1,48	83,08	4,86	18,90	91,85
Л-65/14	10,12	3,49	1,55	1,26	83,58	5,35	18,66	99,83
Тамараж	9,26	3,15	1,95	1,89	83,75	6,63	18,47	122,46
НСР ₀₅	0,54	0,17	0,08	0,10	4,18	0,39	0,17	6,19

РСК Кахолонг (1,57%), Л-50/14 (1,48%), Тамараж (1,89%). Величина БЭВ в зерне образцов изменялась от 82,90% у сорта Бакалавр до 85,17% у сорта Кулон, что оказалось на уровне стандарта Старт (82,79%).

Расчет содержания валовой энергии (в кг) зерна показал близкие значения признака у разных образцов, достоверно приближенные к стандарту (18,82 МДж). Выход валовой энергии с урожаем зерна стандарта Старт составил 75,84 ГДж/га. На уровне стандарта по величине показателя оказался сорт Бакалавр с выходом валовой энергии 77,58 ГДж/га.

Все другие образцы характеризовались существенным превышением стандарта по величине показателя. Урожай зерна семи образцов отличился наибольшей биоэнергетической ценностью, превышающей величину 90,0 ГДж/га, среди которых особо выделились линия Л-65/14 (99,83 ГДж/га), сорт РСК Коралл (108,40 ГДж/га), гибрид Тамараж (122,46 ГДж/га), что выше стандарта на 31,6–61,5% соответственно.

Характеристика новых сортов и гибрида зернового сорго

Сорта Кулон и Принц демонстрируют значительные преимущества перед стандартным сортом Старт, формируя более высокую урожайность и превосходное качество зерна. Благодаря своей универсальности они идеально подходят для различных целей — от получения продовольственного и фуражного зерна до использования в качестве сырья для силоса, сенажа и моноорма (рис. 1, 2).

Рекомендуемая технология выращивания предполагает посев во II или III декаде мая. Применяется широкорядный способ посева с междурядьями 0,70 м с последующими двумя междурядными обработками, расстояние между растениями в ряду — 5–6 см, оптимальная густота стояния растений — 80–100 тыс. на 1 га.

В 2024 году сорт Кулон¹³ был включен в Госреестр и разрешен к использованию на территории Уральского региона (9), а сорт Принц¹⁴ — по 7-му, 8-му и 9-му регионам. В этом же году оба сорта защищены патентами.

В 2023 году новый гибрид зернового сорго под названием Тамараж (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) передан на государственное сортоиспытание. Благодаря своей холодостойкости и прочности стебля этот гибрид не подвержен полеганию. Особенности гибрида делают его идеальным выбором для получения зерна, которое используется как ценный фураж для откорма животных и птицы, а также для пищевой промышленности (рис. 3).

Особенности семеноводства гибрида: оптимальная густота стояния растений для материнской формы 100–120 тыс. на 1 га, отцовской — 100–150 тыс. Материнская линия гибрида

Рис. 1. Общий вид посевов нового сорта зернового сорго Кулон (опытное поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго») 2025 г. Фото авторов

Fig. 1. General view of crops of a new variety of grain sorghum Kulon (experimental field of the Russian Research Institute of Sorghum). 2025. Photo by the authors



Рис. 2. Общий вид посевов нового сорта зернового сорго Принц (опытное поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго»). 2025 г. Фото авторов

Fig. 2. General view of crops of a new variety of grain sorghum Prints (experimental field of the Russian Research Institute of Sorghum). 2025. Photo by the authors



Рис. 3. Гибрид зернового сорго Тамараж (F1) (опытное поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго»). 2025 г. Фото авторов

Fig. 3. Tamarazh grain sorghum hybrid (F1) (experimental field of the Russian Research Institute of Sorghum). 2025. Photo by the authors



¹³ Патент на селекционное достижение № 13541 зерновое сорго сорт Кулон зарегистрирован в Государственном реестре охраняемых селекционных достижений 19.04.2024.

¹⁴ Патент на селекционное достижение № 13540 зерновое сорго сорт Принц зарегистрирован в Государственном реестре охраняемых селекционных достижений 19.04.2024.

А2 Тамараж размножается на изолированном участке при высеве ее чередующимися рядами с фертильным аналогом-закрепителем стерильности линией В Тамараж. Для успешного выращивания гибрида Тамараж посев проводят с середины до конца мая, используя широкорядный метод (0,70 м).

Выводы/Conclusions

В результате исследований выделены лучшие образцы, которые значительно превосходили сорт стандарт Старт: по интенсивности стартового роста — на 7,5–11,6%, по высоте растений в конце вегетации — на 11,0–29,7%, по площади наибольшего листа сорта РСК Коралл, РСК Кахолонг, Принц — на 96,2–109,7%, гибрид Тамараж на 309,0%; по площади флагового листа — сорта Ассистент, РСК Коралл, РСК Кахолонг, Принц, линия Л-50/14 — на 55,5–75,8%, гибрид Тамараж — в 2,9 раза.

Установлено существенное превышение массы зерна с метелки образцов РСК Каскад, Магистр, РСК Коралл, РСК Кахолонг, Л-251/14, Л-65/14 по сравнению со стандартом — на 47,2–68,8%, у

гибрида Тамараж — на 153,5%. Выделены образцы с урожайностью зерна 4,40–6,63 т/га, превосходящие стандарт на 9,2–64,5%. Пять сортов и две линии Л-50/14 и Л-65/14 достоверно превысили стандарт по урожайности биомассы на 27,9–57,9%, гибрид Тамараж — на 88,9%.

Урожай зерна семи образцов отличился наибольшей биоэнергетической ценностью, превышающей величину 90,0 ГДж/га, среди которых особо выделились линия Л-65/14 (99,83 ГДж/га), сорт РСК Коралл (108,40 ГДж/га), гибрид Тамараж (122,46 ГДж/га), что выше стандарта на 31,6–61,5% соответственно. Образцы зернового сорго с высокой энергетической ценностью зерна созданы для пополнения разнообразия ассортимента фуражных культур в регионе возделывания.

Таким образом, в Государственный реестр селекционных достижений в 2019 году были внесены новые сорта зернового сорго Магистр, Ассистент, в 2020 году — РСК Каскад, в 2022 году — РСК Коралл, РСК Кахолонг, в 2024 году — Кулон, Принц с высокой биоэнергетической оценкой зерна, успешно используемые в сельскохозяйственном производстве.

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 тематического плана ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы» согласно государственному заданию № 1022051600013-1 и № 124020300044-6 Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

FINANCING

The work was carried out within the framework of the thematic plan of the Federal State Budgetary Institution "Russian Scientific Research and Design Technological Institute of Sorghum and Corn" in accordance with state assignment No. 1022051600013-1 and No. 124020300044-6 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Popescu A., Dinu T.A., Stoian E. Sorghum — an important cereal in the world, in the European Union and Romania. *Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering in Agriculture and rural development*. 2018; 18(4): 271–284.
2. Mundia C.W., Secchi S., Akamani K., Wang G. A Regional Comparison of Factors Affecting Global Sorghum Production: The Case of North America, Asia and Africa's Sahel. *Sustainability*. 2019; 11(7): 2135. <https://doi.org/10.3390/su11072135>
3. Ковтунова Н.А., Ковтунов В.В., Романюкин А.Е., Сухенко Н.Н., Ермолина Г.М. Урожайность и качество зеленой массы новых сортов сорго сахарного в АНЦ «Донской». *Аграрная наука*. 2022; (12): 93–97. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-365-12-93-97>
4. Кибальник О.П., Ефремова И.Г., Боцарева Ю.В., Прахов А.В., Семин Д.С. Продуктивность сорговых культур в зависимости от агротехнических приемов возделывания в регионах Российской Федерации (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021; 22(2): 155–166. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.155-166>
5. Kibalnik O., Kukoleva S., Semin D., Efremova I., Starchak V. Evaluation of the combining ability of CMS lines in crosses with samples of grain sorghum and Sudan grass. *Agronomy Research*. 2021; 19(4): 1781–1790. <https://doi.org/10.15159/AR.21.120>
6. Кибальник О.П., Семин Д.С., Ефремова И.Г., Кибальник С.В. Корреляционные взаимосвязи хозяйственно ценных признаков образцов сахарного сорго в засушливых условиях Нижнего Поволжья. *Аграрная наука*. 2023; (7): 92–96. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-92-96>
7. Бычкова В.В., Кибальник О.П., Сазонова И.А., Каменева О.Б. Влияние метеорологических условий года на биохимический состав зерна сорго. *Аграрная наука*. 2023; (12): 102–107. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-102-107>

REFERENCES

1. Popescu A., Dinu T.A., Stoian E. Sorghum — an important cereal in the world, in the European Union and Romania. *Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering in Agriculture and rural development*. 2018; 18(4): 271–284.
2. Mundia C.W., Secchi S., Akamani K., Wang G. A Regional Comparison of Factors Affecting Global Sorghum Production: The Case of North America, Asia and Africa's Sahel. *Sustainability*. 2019; 11(7): 2135. <https://doi.org/10.3390/su11072135>
3. Kovtunova N.A., Kovtunov V.V., Romanyukin A.E., Sukhenko N.N., Ermolina G.M. Green mass productivity and quality of new sweet sorghum varieties in the ARC "Donskoy". *Agrarian science*. 2022; (12): 93–97 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-365-12-93-97>
4. Kibalnik O.P., Efremova I.G., Bochkareva Yu.V., Prakhov A.V., Semin D.S. Productivity of sorghum crops depending on agrotechnical methods of cultivation in the regions of the Russian Federation (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021; 22(2): 155–166 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.155-166>
5. Kibalnik O., Kukoleva S., Semin D., Efremova I., Starchak V. Evaluation of the combining ability of CMS lines in crosses with samples of grain sorghum and Sudan grass. *Agronomy Research*. 2021; 19(4): 1781–1790. <https://doi.org/10.15159/AR.21.120>
6. Kibalnik O.P., Semin D.S., Efremova I.G., Kibalnik S.V. Correlation relationships of economically valuable characteristics of sugar sorghum samples in arid conditions of the Lower Volga region. *Agrarian science*. 2023; (7): 92–96 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-92-96>
7. Bychkova V.V., Kibalnik O.P., Sazonova I.A., Kameneva O.B. Influence of meteorological conditions of the year on the biochemical composition of sorghum grain. *Agrarian science*. 2023; (12): 102–107 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-102-107>

8. Зотеев В.С., Матвиенко Е.В., Зотеев С.В. Использование новых сортов сорго зернового селекции Поволжского НИИСС им. П.Н. Константинова на пищевые и кормовые цели. *International Agricultural Journal*. 2023; 66(2): 657–674. <https://elibrary.ru/awaskr>
9. Кибальник О.П., Ефремова И.Г., Семин Д.С., Старчак В.И., Степанченко Д.А., Куколева С.С. Использование мировой коллекции ВИР в селекции новых сортов и гибридов сахарного сорго для засушливых регионов РФ. *Аграрная наука*. 2023; (1): 78–82. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-366-1-78-82>
10. Антимонов А.К., Сыркина Л.Ф., Антимонova О.Н., Косых Л.А. Основные итоги и перспективы развития лаборатории селекции и семеноводства крупяных и сорговых культур. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018; 20(2–2): 390–395. <https://elibrary.ru/vjwxpe>
11. Левицкая Н.Г., Демакина И.И. Современные изменения климата Саратовской области и стратегия адаптации к ним селекции и агротехнологий. *Успехи современного естествознания*. 2019; (10): 7–12. <https://doi.org/10.17513/use.37206>
12. Киселева Н.С. Способ вычисления площади листа груши по линейным измерениям с помощью расчетных коэффициентов и методом вариационной статистики. *Сельскохозяйственная биология*. 2017; 52(1): 211–217. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.211rus
13. Дорофеева М.М., Бонетская С.А. Сравнительный анализ некоторых классических и современных методик определения площади листовой поверхности. *Растительные ресурсы*. 2020; 56(2): 182–192. DOI: 10.31857/S0033994620020041
14. Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Соколова И.Г., Жаров И.Н. Методика измерения параметров листовых пластинок по цифровому изображению с использованием специализированного программного обеспечения. *Растительные ресурсы*. 2019; 4(55): 537–547. DOI: org/10.1134/S0033994619040101
15. Беседа Н.А. Создание признаковой и генетической коллекции крупнозерновых форм сорго зернового. *Научный журнал КубГАУ*. 2010; 62: 366–378. <https://elibrary.ru/mvuann>

ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Сергеевич Семин

главный научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук
sds-balashov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-5256>

Ирина Григорьевна Ефремова

ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук
efremova-irina1946irina@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7188-9332>

Светлана Сергеевна Куколева

старший научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук
lily74-88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0582-9024>

Виктория Игоревна Старчак

ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук
viktorija_starchak@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7312-4547>

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, 1-й Институтский проезд, 4, Саратов, 410050, Россия

8. Zoteev V.S., Matvienko E.V., Zoteev S.V. The use of new varieties of sorghum grain breeding Povolzhsky NIIS them. [sic!] P.N. Konstantinov for food and feed purposes. *International Agricultural Journal*. 2023; 66(2): 657–674 (in Russian). <https://elibrary.ru/awaskr>

9. Kibalnik O.P., Efremova I.G., Semin D.S., Starchak V.I., Stepanchenko D.A., Kukoleva S.S. The use the VIR world collection in the selection of new varieties and hybrids of sugar sorghum for arid regions of the Russian Federation. *Agrarian science*. 2023; (1): 78–82 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-366-1-78-82>

10. Antimonov A.K., Syrkina L.F., Antimonova O.N., Kosykh L.A. The main results and prospects of development laboratory of breeding and seed production cereals and sorghum crops. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018; 20(2–2): 390–395 (in Russian). <https://elibrary.ru/vjwxpe>

11. Levitskaya N.G., Demakina I.I. Modern climate characters of the Saratov region and adaptation strategy of breeding and agrotechnologies to them. *Advances in current natural sciences*. 2019; (10): 7–12 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.37206>

12. Kiseleva N.S. Method for calculating the area of a pear leaf based on linear measurements using calculated coefficients and the method of variation statistics. *Agricultural Biology*. 2017; 52(1): 211–217 (in Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.211rus

13. Dorofeeva M.M., Bonetskaya S.A. Comparative analysis of some classical and modern methods for determining leaf surface area. *Plant Resources*. 2020; 56(2): 182–192 (in Russian). DOI: 10.31857/S0033994620020041

14. Samarkina E.I., Samarkin A.I., Sokolova I.G., Zharov I.N. Method for Measuring Leaf Parameters from a Digital Image Using Specialized Software. *Plant Resources*. 2019; 4(55): 537–547 (in Russian). DOI: org/10.1134/S0033994619040101

15. Beseda N.A. Creation of the indicative and genetic collection of the large-mass grain of the grain sorghum. *Scientific Journal of KubSAU*. 2010; 62: 366–378 (in Russian). <https://elibrary.ru/mvuann>

ABOUT THE AUTHORS

Dmitry Sergeevich Semin

Chief Researcher, Candidate of Agricultural Sciences
sds-balashov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-5256>

Irina Grigorievna Efremova

Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences
efremova-irina1946irina@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7188-9332>

Svetlana Sergeevna Kukoleva

Senior Researcher, Candidate of Agricultural Sciences
lily74-88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0582-9024>

Victoria Igorevna Starchak

Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences
viktorija_starchak@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7312-4547>

Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 4 1st Institutsky Ave., Saratov, 410050, Russia

УДК 579.64 + 631.8:633.318

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-91-98

А.П. Юрков¹ ✉А.А. Крюков¹Т.Р. Кудряшова¹А.И. Беляева¹С.Н. Никитин²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Россия

²Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.С. Немцева, Ульяновск, Россия

✉ ap.yurkov@arriam.ru

Поступила в редакцию: 12.11.2025

Одобрена после рецензирования: 28.12.2025

Принята к публикации: 25.01.2026

© Юрков А.П., Крюков А.А., Кудряшова Т.Р., Беляева А.И., Никитин С.Н.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-91-98

Andrey P. Yurkov¹ ✉Alexey A. Kryukov¹Tatyana R. Kudryashova¹Angelina I. Belyaeva¹Sergey N. Nikitin²

¹All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Russia

²Samara Science Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Agricultural Scientific Research Institute, Ulyanovsk, Russia

✉ ap.yurkov@arriam.ru

Received by the editorial office: 12.11.2025

Accepted in revised: 28.12.2025

Accepted for publication: 25.01.2026

© Yurkov A.P., Kryukov A.A., Kudryashova T.R., Belyaeva A.I., Nikitin S.N.

Оценка эффективности инокулянтов грибов арбускулярной микоризы и перспективы их применения в сельском хозяйстве

РЕЗЮМЕ

Работа посвящена анализу симбиотической эффективности и активности грибов арбускулярной микоризы (АМ), поддерживаемых в коллекции ФГБНУ ВНИИСХМ. Представлен сравнительный анализ симбиотической эффективности и активности 12 штаммов грибов АМ в модельной тест-системе на основе сильно отзывчивой на микоризацию линии MIS-1 люцерны хмелевидной в условиях дефицита доступного для питания растений фосфора в почве. Корреляционный анализ показал существенную положительную линейную взаимосвязь между симбиотической эффективностью штаммов и их активностью — встречаемостью микоризной инфекции (F) в корнях растения-хозяина. Между тем, интенсивность развития мицелия, обилие симбиотических структур (арбускул и везикул) в корне не имели достоверной корреляции с показателями АМ-эффективности, что может говорить об отсутствии родоспецифичности АМ-грибов к растению-хозяину. Эти данные подтверждают перспективы к применению эффективных штаммов грибов АМ на широком спектре агрокультур. Обсуждается возможность применения грибов АМ для повышения адаптации сельскохозяйственных растений к абиотическим стресс-факторам — засухе и засолению. С учетом неспецифичности взаимодействия с видами растений в результате исследования четыре эффективных и активных штамма грибов АМ рекомендованы для полевой апробации.

Ключевые слова: *Medicago lupulina*, симбиотическая эффективность, растительно-микробная система, гриб арбускулярной микоризы

Для цитирования: Юрков А.П., Крюков А.А., Кудряшова Т.Р., Беляева А.И., Никитин С.Н. Оценка эффективности инокулянтов грибов арбускулярной микоризы и перспективы их применения в сельском хозяйстве. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 91–98. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-91-98>

Evaluation of the efficiency of arbuscular mycorrhiza fungal inoculants and prospects for their use in agriculture

ABSTRACT

The work is devoted to the analysis of the symbiotic efficiency and activity of arbuscular mycorrhiza (AM) fungi maintained in ARRIAM collection. A comparative analysis of the symbiotic efficiency and activity for 12 strains of AM fungi in a model test system based on the black medic MIS-1 line highly responsive to mycorrhization in conditions of a deficiency of phosphorus available for plant nutrition in the soil is presented. Correlation analysis showed a significant positive linear relationship between the symbiotic efficiency of strains and their activity, the frequency of mycorrhizal infection (F) in the roots of the host plant. Meanwhile, the intensity of mycelium development and the abundance of symbiotic structures (arbuscules and vesicles) did not significantly correlate with AM efficiency indicators that may indicate the absence of genus-specificity of AM fungi to the host plant. These data confirm the prospects for use of effective strains of AM fungi in a wide range of agricultural crops. The possibility of using AM fungi to enhance the adaptation of plants in agriculture to abiotic stress factors such as drought and salinity is discussed. Taking into account the nonspecificity of interaction with plant species, as a result of the study, four effective and active strains of AM fungi are recommended for field testing.

Key words: *Medicago lupulina*, symbiotic efficiency, plant-microbial system, arbuscular mycorrhiza fungus

For citation: Yurkov A.P., Kryukov A.A., Kudryashova T.R., Belyaeva A.I., Nikitin S.N. Evaluation of the efficiency of arbuscular mycorrhiza fungal inoculants and prospects for their use in agriculture. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 91–98 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-91-98>

Введение/Introduction

Развитие современного биологического земледелия невозможно без создания эффективных растительно-микробных систем. Функционирование наземных экосистем в значительной степени зависит от мутуалистических симбиозов, среди которых доминирует арбускулярная микориза (АМ), формируемая 92% семейств растений с грибами *Glomeromycota* [1].

АМ широко распространена и обеспечивает не менее 20% объема круговорота веществ в наземных экосистемах [2]. Ее основные функции включают усиление минерального питания (в первую очередь фосфорного), модуляцию гормонального статуса, повышение устойчивости растений к абиотическим стрессам, таким как засуха и засоление [3–7].

Существенной проблемой является повсеместное нарушение формирования АМ как в естественных, так и в агроценозах в результате антропогенной деятельности. Таким образом, важным этапом развития почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия является внедрение биопрепаратов на основе инокулянтов грибов АМ в качестве усилителей роста растений [8, 9].

Для создания АМ-биопрепаратов организован ряд мировых коллекций грибов АМ (табл. 1), в том числе создается российская коллекция АМ-грибов, насчитывающая уже более 150 изолятов, выделенных из разных регионов РФ.

Анализ эффективности инокуляции грибами АМ возможен с применением разработанного способа экспресс-тестирования эффективности АМ-инокулянтов на модельной сильноотзывчивой на микоризацию в условиях низкого уровня доступного фосфора линии MIS-1 люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.; патент РФ от 22.07.2022 № 2776652¹).

Цель данной работы — сравнительная оценка симбиотической эффективности и активности штаммов грибов арбускулярной микоризы из коллекции ВНИИСХМ в условиях дефицита фосфорного питания в модельной системе с люцерной хмелевидной (*Medicago lupulina*) для выявления наиболее перспективных штаммов-кандидатов для создания микробных инокулянтов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Растительный и грибной материал. В исследовании использована модельная линия MIS-1 люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L. var. *vulgaris* Koch, однолетник) с высоким откликом на микоризацию — высокую симбиотическую эффективность [10].

Для оценки симбиотической эффективности в 2024 г. взяты 12 штаммов грибов из Российской коллекции грибов арбускулярной микоризы ФГБНУ ВНИИСХМ (коллекция поддерживается А.П. Юрковым), пополненной в результате

Таблица 1. Число изолятов и видов в коллекциях грибов АМ

Table 1. Number of isolates and species in the collections of AM fungi

Коллекция грибов АМ	Страна	Число изолятов	Число видов
Международный банк <i>Glomeromycota</i> (The International Bank for the <i>Glomeromycota</i> , BEG) ²	Франция	23	20
Бельгийская коллекция (<i>Glomeromycota</i> in vitro Collection BCCM™/MUCL, GINCO-Bel ³)	Бельгия	11	5
Канадская коллекция (<i>Glomeromycota</i> In vitro Collection, GINCO-Can) ⁴	Канада	16	6
Швейцарская коллекция грибов АМ (Swiss Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, SAF) ⁵	Швейцария	>200	26
Индийский центр коллекции микоризных культур (Centre for Mycorrhizal Culture Collection, CMCC) ⁶	Индия	50	17
Американская коллекция (International Culture Collection of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi, INVAM) ⁷	США	900	78
Бразильская международная коллекция культур (The International Culture Collection of <i>Glomeromycota</i> , CICG) ⁸	Бразилия	22	22
Российская коллекция грибов арбускулярной микоризы ФГБНУ ВНИИСХМ	Россия	> 150	> 15

¹ Юрков А.П. Патент RU 2776652. Способ оценки качества биопрепаратов на основе грибов арбускулярной микоризы. Опубликовано 22.07.2022.

² Culture Database. D. Redecker (digital resource published online: 04 Jan 2023; accessed 01 Nov 2025). URL: <http://www.i-beg.eu>

³ *Glomeromycota* in vitro collection: mycorrhiza strains. Z. Benyahia (digital resource published online: 17 Jun 2025; accessed 01 Nov 2025). URL: <https://bccm.belspo.be/MUCL-catalogue-search>

⁴ Catalogue of Arbuscular Mycorrhizal fungi strains available in the *Glomeromycetes* in vitro Collection. F. Stefani (digital resource published online: 28 Mar 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://agriculture.canada.ca/en/science/agriculture-and-agri-food-research-centres/canadian-collection-arbuscular-mycorrhizal-fungi-ccamf/catalogue-arbuscular-mycorrhizal-fungi-strains-available-glomeromycetes-vitro-collection>

⁵ SAF list of isolates. M. van der Heijden (digital resource published online: 28 Oct 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/en/home/topics/environment-resources/soil-bodies-water-nutrients/plant-soil-interactions/mycorrhizal-ecology/swiss-collection-of-arbuscular-mycorrhizal-fungi/saf-list-of-isolates.html>

⁶ Centre for Mycorrhizal Culture Collection. D. Kumar (digital resource published online: 10 Jan 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <http://mycorrhizae.org.in/cmcc/isolates.php>

⁷ Species Descriptions. J. Bever (digital resource published online: 29 Oct 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://invam.ku.edu/species-descriptions>

⁸ Reference Cultures in CICG. S.L. Stürmer (digital resource published online: 04 Apr 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://sites.google.com/view/cicg-furb-english/amf-cultures/reference-cultures>

экспедиций на территории Северо-Западного региона России, Северного Кавказа и Горного Алтая, проведенных в рамках ряда проектов под руководством А.П. Юркова: РФФИ-офи_м № 15-29-02753 (2015–2018 гг.); РФФИ-мк № 19-29-05275 (2019–2021 гг.); РНФ № 22-16-00064 (2022–2024 гг.).

Грибы АМ, как правило, являются неспецифическими симбионтами растений, образуя симбиоз с широким кругом растений-хозяев, в том числе с десятками сельскохозяйственных культур (за исключением некоторых видов крестоцветных, осоковых, маревых, ситниковых, гвоздичных, гречишных, а также люпина у бобовых). Неспецифическая к видам растений эффективность грибов АМ показана в ряде экспериментов, проведенных в географической сети опытов ФГБНУ ВНИИСХМ [11, 12].

По критериям воспроизводимости результатов инокуляции (стабильного отклика на микоризацию у растения-хозяина), а также по стабильному формированию внутрикорневых спор и везикул в корнях накопительной культуры были отобраны следующие штаммы грибов АМ: № 3.3 *Funneliformis* sp., № 5 *Rhizophagus* sp., № 6 *Claroideoglomus* sp., № 8 *Sclerocystis* sp., № 11 *Rhizophagus* sp., № 16 *Glomus* sp., № 28 *Paraglomus* sp., № 36 *Rhizophagus* sp., № 37 *Rhizophagus* sp., № 38 *Acaulospora* sp., № 76.4 *Nanoglomus* sp., RCAM00320 *Rhizophagus irregularis*. Поскольку грибы АМ являются облигатными симбионтами растений, то их культивирование проводится на плектрантусе южном (*Plectranthus australis* R.Br. = *P. verticillatus* (L.f.) Druce).

Инокулянты грибов АМ готовили в соответствии с опубликованной ранее работой [10]. Инокулянт содержал корни плектрантуса в среднем со 100 везикулами АМ-гриба на один проросток *M. lupulina*. Морфологическую идентификацию грибов АМ до уровня рода провели с помощью световой микроскопии. Для анализа использовали споры и спорокарпы, которые предварительно помещали в поливиниллактоглицерин (PVLG), реактив Мельцера. По каждому образцу изучили 120 спор с оценкой их цвета, размера, формы, структуры оболочек, а также характеристики несущей гифы и внекорневого мицелия. Идентификацию выполняли с использованием специализированных определителей⁹ и баз данных онлайн^{10–12}.

Схема эксперимента и условия выращивания растений. Разработанный микровегетационный метод обеспечивает оптимальные условия

для развития АМ и позволяет избежать спонтанного инфицирования ризобиями и другими симбиотическими микроорганизмами: световой бокс предварительно стерилизовали УФ; субстрат (почво-песчаную смесь) и инструменты стерилизовали автоклавированием; семена скарифицировали; воду для полива кипятили. Способ оценки качества АМ-инокулянтов защищен патентом¹³.

Субстрат для культивирования, представляющий собой смесь высушенной на воздухе почвы и песка в соотношении 2:1 по весу, дважды автоклавировали (при 134 °С в течение часа, интервал между обработками — 2 суток), чтобы достичь стерильности без признаков токсичности. Семена люцерны подвергали скарификации в концентрированном растворе H₂SO₄ в течение 5 минут. Семена стратифицировали при температуре +5 °С в течение суток и затем проращивали при температуре +27 °С в течение двух суток в темноте. На один сосуд, заполненный субстратом (210 г), высевали два проростка одинакового размера.

Агрохимическая характеристика почвы: дерново-подзолистая суглинистая с низким содержанием фосфора — 1,7 мг на 100 г, калий — 6,5 мг на 100 г. Содержание органических веществ — 3,6%; рН_{KCl} — 6,4 (после известкования), рН_{H₂O} — 7,3 [10].

Растения опытной группы при посадке инокулировали штаммами АМ-грибов, контрольной — фрагментами корней плектрантуса без гриба. Растения выращивали в условиях 18/6 ч смены дня и ночи при температуре 24–26 °С, относительной влажности воздуха 58–63%, фотосинтетически активной радиации 150 мкмоль/м²/с.

Полив осуществляли из расчета 0,6 ч. от общей влагоемкости субстрата. Учет продуктивности и микроскопический анализ растений проводили на 48-й день от посадки в фазу цветения (биологическая повторность — 10 растений на каждый вариант).

Определяли сырую массу надземных частей, число листьев и цветоносов, а также массу сухого вещества в надземных частях (ГОСТ 31640-2012¹⁴). Симбиотическая эффективность АМ рассчитана стандартно по формуле Ю. Одума:

$$E = ([+AM] - [-AM]) / [-AM] \cdot 100\%, \quad (1)$$

где [+AM] и [-AM] — значения параметра продуктивности для микоризованных и немикоризованных растений соответственно.

⁹ Schenk N.C., Perez Y. Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi. 3rd Edn. Gainesville, FL: Synergistic Publications. 1990; 286. ISBN: 9780962598036

¹⁰ AMF Species List. S.L. Stürmer (digital resource published online: 04 Apr 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://sites.google.com/view/cicg-furb-english/taxonomy/amf-species-list>

¹¹ Species Descriptions. J. Bever (digital resource published online: 29 Oct 2025; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://invam.ku.edu/species-descriptions>

¹² Species descriptions and illustrations. J. Blaszkowski (digital resource published online: 30 Mar 2023; accessed 01 Nov 2025).

URL: <https://zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Species%20descriptions%20of%20AMF.html>

¹³ Юрков А.П. Патент RU 2776652. Способ оценки качества биопрепаратов на основе грибов арбускулярной микоризы. Опубликовано 22.07.2022.

¹⁴ ГОСТ 31640-2012 Межгосударственный стандарт. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. М.: Стандартинформ. 2013; 14.

Оценка показателей микоризации. Для анализа АМ-структур были взяты образцы измельченных корней *M. lupulina*, окрашенные трипановым синим [13], мацерированные (осветленные) и нарезанные на сегменты длиной 1 см с применением стереомикроскопа Stemi 2000 (Carl Zeiss, Германия). Последующий микроскопический анализ для количественной оценки АМ [14] проведен с использованием микроскопа CX43 (Olympus, Япония), оснащенного 10-кратным широкоугольным окуляром и 10-кратным объективом Plan Achromat PLCN10X-1-7. В давленных окрашенных корнях с применением разработанной компьютерной программы¹⁵ проведена оценка индексов микоризации: встречаемость микоризной инфекции (F , %), интенсивность микоризации в микоризованных частях корней (m , %), обилие арбускул и везикул в микоризованных частях корней (a и b соответственно).

Статистический анализ. Для оценки статистической значимости различий в параметрах продуктивности, симбиотической эффективности и показателях микоризации использовали дисперсионный анализ (ANOVA) и апостериорный (post hoc) HSD-тест Тьюки. Анализ данных проведен в ПО Statistica v.12.0 (StatSoft, США).

Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез в данном исследовании принимали $p < 0,05$ при сравнении средних значений и $p < 0,01$ при оценке достоверности линейных коэффициентов корреляции (r).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Проведена постановка вегетационного эксперимента на стерильном субстрате с целью отбора наиболее эффективного штамма гриба АМ из коллекции ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии». Для сравнения были взяты следующие штаммы: № 3.3 *Funneliformis* sp., № 5 *Rhizophagus* sp., № 6 *Claroideoglomus* sp., № 8 *Sclerocystis* sp., № 11 *Rhizophagus* sp., № 16 *Glomus* sp., № 28 *Paraglomus* sp., № 36 *Rhizophagus* sp., № 37 *Rhizophagus* sp., № 38 *Acaulospora* sp., № 76.4 *Nanoglomus* sp., RCAM00320 *Rhizophagus irregularis*.

Показатели продуктивности растения-хозяина (люцерны хмелевидной) и симбиотической эффективности с грибами АМ были оценены на 48-е сутки от посадки в фазу цветения по сырой массе

Таблица 2. Показатели продуктивности люцерны, инокулированной различными грибами АМ

Table 2. Productivity indicators of black medic inoculated with various AM fungi

Штамм	Масса НЧ* одного растения, мг на натуральную влажность	Масса сухого вещества НЧ одного растения, мг	Число листьев**	Число цветоносов
Без М (контроль)	307,3 ^a ± 22,0	40,8 ^a ± 4,0	8,3 ^a ± 0,4	2,0 ^c ± 0,1
№ 38	298,5 ^a ± 21,7	41,7 ^a ± 4,4	8,0 ^a ± 0,4	1,2 ^b ± 0,2
№ 36	461,3 ^b ± 29,2	64,6 ^b ± 7,6	7,2 ^a ± 0,3	0,3 ^a ± 0,1
№ 8	478,0 ^b ± 27,4	72,2 ^b ± 6,1	7,4 ^a ± 0,4	2,0 ^c ± 0,2
№ 6	483,3 ^b ± 25,8	68,8 ^b ± 4,5	7,8 ^a ± 0,4	1,0 ^b ± 0,1
№ 3.3	487,9 ^b ± 23,8	69,5 ^b ± 5,2	8,5 ^a ± 0,5	3,1 ^d ± 0,3
№ 11	501,4 ^b ± 30,4	85,0 ^c ± 7,0	9,3 ^b ± 0,5	3,5 ^d ± 0,3
№ 16	646,4 ^c ± 28,7	110,1 ^d ± 6,6	9,5 ^b ± 0,5	2,2 ^c ± 0,2
№ 5	651,3 ^c ± 27,2	112,0 ^d ± 6,8	9,5 ^b ± 0,4	0,7 ^d ± 0,1
№ 76.4	755,2 ^d ± 38,5	128,5 ^d ± 11,3	9,8 ^b ± 0,3	3,8 ^e ± 0,4
№ 28	803,6 ^d ± 35,3	134,7 ^d ± 11,2	8,7 ^a ± 0,4	0,4 ^a ± 0,1
№ 37	818,4 ^d ± 38,7	129,4 ^d ± 7,8	9,3 ^b ± 0,5	0,5 ^a ± 0,2
RCAM00320	845,5 ^e ± 38,3	135,1 ^e ± 9,3	9,6 ^b ± 0,4	6,3 ^e ± 0,7

Примечание: НЧ* — надземных частей; число листьев* — число листьев на главном стебле; без М — вариант без инокуляции грибом АМ. ^{a, b, c, d, e} — разные буквы указывают на достоверные ($p < 0,05$) различия средних значений по вариантам для каждого отдельного показателя продуктивности (ANOVA, критерий Тьюки). Штаммы ранжированы по возрастанию ключевого параметра — сырого веса надземных частей, равно как и симбиотической эффективности АМ по этому параметру.

и массе сухого вещества в надземных частях, числу листьев и цветоносов (табл. 2, 3), показатели микоризации — по встречаемости АМ-инфекции (F , %), интенсивности микоризации в микоризованной части корня (m , %), обилию арбускул и везикул в микоризованной части корня (a и b , %) (табл. 3).

Следует отметить, что имели место различия в содержании воды в надземных частях растений люцерны, инокулированных разными штаммами грибов АМ, которое варьировало от 82,8 до 86,7%, что можно рассчитать, исходя из представленных значений сухого и сырого веса (табл. 2).

Наибольшая продуктивность растений и симбиотическая эффективность были показаны в симбиозе для штаммов № 28, 37, RCAM0032 (табл. 2, 3) при высокой их активности в корнях (табл. 4, 5), два из них относятся к роду *Rhizophagus* — штамм № 37 и RCAM00320. Чуть меньшая эффективность показана для грибов АМ из родов *Nanoglomus* и *Paraglomus* (табл. 5). Наиболее выраженная эффективность наблюдалась при расчете по весу надземных частей (табл. 3).

Симбиотическая эффективность, рассчитанная по массе при натуральной влажности и массе сухого вещества в надземных частях, наблюдалась достоверно выше при инокуляции штаммом RCAM00320 гриба *R. irregularis* против контрольной группы растений без инокуляции АМ-грибом. Число цветоносов достоверно выше при инокуляции штаммом RCAM00320 против контрольной группы растений без инокуляции АМ-грибом, при

¹⁵ Воробьев Н.И., Юрков А.П., Проворов Н.А. Свидетельство от 12.02.2016 № 2016612112 о регистрации программы ЭВМ «Программа вычисления индексов микоризации корней растений». М.: ФИПС. 2016.

этом число листьев на главном стебле значимо не отличалось от контроля, но было высоким (табл. 2).

Следует отметить, что результаты с низкой эффективностью штаммов № 8, 3.3, 11, 6 не исключают их высокой эффективности при среднем или высоком уровне фосфора, доступного для питания растений в почве.

В результате оценки микоризации корней было показано, что встречаемость АМ-инфекции и интенсивность АМ при инокуляции штаммом RCAM00320 не имели достоверной разницы в сравнении с инокуляцией штаммами № 28, 37, но были чуть выше (табл. 4). Для других штаммов эти параметры были, как правило, значительно ниже. Указанные три штамма имели более высокие показатели *m*, *a* и *b*.

Результаты корреляционного анализа параметров симбиотической эффективности АМ и активности грибов в корнях растения-хозяина показали, что среди индексов микоризации встречаемость микоризной инфекции (*F*) имела достоверную ($p < 0,01$) корреляцию с эффективностью, рассчитанной как при натуральной влажности, так и по сухому веществу НЧ ($r = 0,82$ и $0,79$ соответственно). Показатели *m*, *a* и *b* не имели достоверных корреляций с параметрами продуктивности. Корреляция между рангом рода гриба АМ и показателями его эффективности и активности отсутствует, что свидетельствует об отсутствии специфичности грибов АМ разных родов к растению-хозяину. При этом по литературным данным известно (с учетом изменений в таксономии¹⁶): 1) *Acaulospora* sp. обладают, как правило, невысокой АМ-эффективностью на растениях *Tamarindus indica*, *Parkia biglobosa*, *Zizyphus mauritiana* [15]; 2) *Rhizophagus* sp. обладают высокой эффективностью на множестве видов растений, включая *Allium cepa*, *Capsicum annuum*, *Cassia siamea*, *Cucumis sativus*, *Glycine max*, *Helianthus annuus*, *Lactuca sativa*, *Lycopersicon esculentum*, *Malus domestica*, *Medicago lupulina*, *M. nolana*, *M. rigidula*, *M. rotata*, *Retama sphaerocarpa*, *Triticum aestivum*, *Trifolium subterraneum*, *Solanum lycopersicum*, *Sorghum bicolor*, *Vigna radiata*, *Vitis vinifera*, *Zea mays*, etc. [5, 9, 11, 12, 15–17]; 3) *Funneliformis* sp. могут быть эффективными на *Cucumis sativus*, *Lactuca sativa*, *Lycopersicon esculentum*, *Helianthus annuus*, *Ipomoea aquatica*, *Solanum lycopersicum*, *Triticum aestivum*, *Vigna radiata*, *Zea mays* [5, 16];

Таблица 3. Показатели симбиотической эффективности люцерны, инокулированной различными грибами АМ

Table 3. Indicators of the symbiotic efficiency of black medic inoculated with various AM fungi

Штамм	Симбиотическая эффективность (%), рассчитанная по:			
	массе НЧ* одного растения, мг на натуральную влажность	массе сухого вещества НЧ одного растения, мг	числу листьев**	числу цветоносов
№ 38	-2,9 ± 0,3	2,2 ± 0,3	-3,7 ± 0,3	-43,0 ± 1,7
№ 36	50,1 ¹ ± 4,8	58,3 ¹ ± 8,9	-12,7 ± 0,9	-83,3 ± 13,4
№ 8	56,2 ¹ ± 5,1	77,0 ¹ ± 9,9	-10,2 ± 0,7	0,6 ± 0,1
№ 6	57,3 ¹ ± 5,1	68,6 ¹ ± 8,0	-5,1 ± 0,4	-48,5 ± 4,2
№ 3.3	58,8 ¹ ± 5,1	70,3 ¹ ± 8,6	2,8 ± 0,2	52,8 ¹ ± 4,6
№ 11	63,1 ¹ ± 5,9	108,3 ¹ ± 13,8	12,7 ¹ ± 0,9	74,9 ¹ ± 5,8
№ 16	110,3 ¹ ± 9,3	169,9 ¹ ± 19,4	15,5 ¹ ± 1,1	9,2 ± 0,8
№ 5	111,9 ¹ ± 9,3	174,5 ¹ ± 20,0	15,2 ¹ ± 0,9	-64,7 ± 12,3
№ 76.4	145,7 ¹ ± 12,8	215,0 ¹ ± 28,1	18,4 ¹ ± 1,1	87,2 ¹ ± 9,2
№ 28	161,5 ¹ ± 13,6	230,1 ¹ ± 29,4	5,2 ± 0,3	-80,0 ± 9,3
№ 37	166,3 ¹ ± 14,3	217,2 ¹ ± 24,8	12,7 ¹ ± 0,9	-74,8 ± 31,7
RCAM00320	175,1 ¹ ± 14,8	231,1 ¹ ± 27,5	16,3 ¹ ± 1,0	210,6 ¹ ± 23,9

Примечание: НЧ* — надземных частей; число листьев* — число листьев на главном стебле; 50,1¹ — наличие достоверной ($p < 0,05$) эффективности по показателю продуктивности.

Таблица 4. Показатели микоризации люцерны, инокулированной различными грибами АМ

Table 4. Indicators of mycorrhization of black medic inoculated with various AM fungi

Штамм	Встречаемость АМ-инфекции (<i>F</i>), %	Интенсивность АМ (<i>m</i>), %	Обилие арбускул (<i>a</i>), %	Обилие везикул (<i>b</i>), %
№ 38	15,2 ^b ± 1,0	22,6 ^{b,c} ± 2,6	54,2 ^a ± 5,4	26,6 ^c ± 6,0
№ 36	16,9 ^b ± 1,3	27,8 ^c ± 3,3	89,0 ^c ± 11,2	37,6 ^c ± 8,7
№ 8	11,4 ^a ± 1,1	10,9 ^a ± 1,3	77,8 ^{b,c} ± 8,3	31,9 ^c ± 7,2
№ 6	69,2 ^e ± 6,5	21,9 ^{b,c} ± 2,3	77,3 ^{b,c} ± 8,6	6,0 ^{ab} ± 1,2
№ 3.3	14,2 ^{a,b} ± 1,1	14,7 ^a ± 1,6	76,1 ^{b,c} ± 6,7	40,5 ^c ± 8,1
№ 11	12,7 ^{a,b} ± 2,2	13,6 ^a ± 1,8	55,8 ^a ± 5,7	36,5 ^c ± 9,0
№ 16	39,2 ^c ± 2,3	18,1 ^{a,b} ± 2,2	70,0 ^b ± 4,6	4,4 ^a ± 1,9
№ 5	72,6 ^e ± 4,3	36,9 ^{d,e} ± 6,0	79,1 ^{b,c} ± 5,4	9,1 ^b ± 2,2
№ 76.4	52,6 ^d ± 5,1	11,6 ^a ± 2,4	48,4 ^a ± 4,9	5,3 ^a ± 1,2
№ 28	91,3 ^f ± 4,4	46,3 ^{e,f} ± 6,3	81,9 ^c ± 3,1	38,8 ^c ± 9,7
№ 37	89,8 ^f ± 5,9	55,4 ^f ± 10,2	86,6 ^c ± 8,1	35,8 ^c ± 7,3
RCAM00320	98,1 ^f ± 7,6	31,9 ^d ± 5,2	71,9 ^{b,c} ± 8,3	43,5 ^c ± 9,9

Примечание: а, b, c, d, e, f — разные буквы над цифрами означают достоверные ($p < 0,05$) различия между средними значениями каждого отдельного показателя микоризации (ANOVA, критерий Тьюки).

4) *Entrophospora* sp. обладают значимой эффективностью на некоторых видах растений, включая *Lactuca sativa*, *Lycopersicon esculentum*, *Glycine max*, *Solanum lycopersicum*, *Vigna unguiculata*, *Zea mays* [5, 9, 15, 16]; 5) *Glomus* sp. обладают, как правило, высокой или значимой эффективностью на множестве видов растений, включая *Capsicum annuum*, *Cassia siamea*, *Cucumis sativus*, *Ipomoea aquatica*, *Liriodendron tulipifera*, *Trifolium subterraneum* [5, 15, 16]; 6) *Paraglomus* sp. обладает высокой эффективностью на *Capsicum annuum* [16]; 7) данные по эффективности АМ для грибов родов *Sclerocystis* и *Nanoglomus* в литературе отсутствуют.

¹⁶ AMF Species List. S.L. Stürmer (digital resource published online: 04 Apr 2025; accessed 01 Nov 2025). URL: <https://sites.google.com/view/cicg-furb-english/taxonomy/amf-species-list>

Таким образом, полученные результаты в настоящем исследовании в целом согласуются с литературными данными, и результаты исследования, подтверждающие отсутствие родоспецифичности грибов АМ во взаимодействии с растением-хозяином, указывают на существенный потенциал использования эффективных штаммов АМ-грибов в выращивании широкого круга сельскохозяйственных культур.

Для выявления наиболее эффективного гриба АМ результаты сведены в таблицу 5 с обобщением характеристик и параметров, полученных в эксперименте. Можно заметить, что в исследовании были представлены пять штаммов рода *Rhizophagus*, но только три из них показали высокую эффективность. Это показывает, что грибы одного рода могут иметь значительную разницу в симбиотической эффективности. На основании оценки эффективности и активности на 48-е сутки от посадки и инокуляции при тестировании в условиях дефицита фосфорного питания с применением высокоотзывчивой на микоризацию линии MIS-1 *Medicago lupulina* штамм RCAM00320 гриба *Rhizophagus irregularis* (табл. 5) можно считать наиболее эффективным для проведения исследований влияния микоризации на адаптацию к низкому уровню фосфора, доступного для питания растений в почве. Следует отметить, что данный штамм уже показал высокую эффективность на ряде кормовых трав и древесных культур в полевых условиях [11, 12, 17, 18].

Штамм RCAM00320 гриба *R. irregularis* может быть применим в условиях действия иных стресс-факторов среды абиотической природы (помимо условий дефицита фосфора) — например, таких, как засуха. Об этом свидетельствуют и первые данные, полученные авторами в модельной растительно-микробной системе (PMC) *M. lupulina* + *R. irregularis* [19]. Повышение устойчивости растений к дефициту влаги в почве показано во многих PMC, таких как *Glycine max* + *R. irregularis*, *Solanum lycopersicum* + *R. irregularis*, *Triticum aestivum* + *Glomus spp.*, *Zea mays* + *R. irregularis*, *Sorghum bicolor* + *R. irregularis*, *Vigna radiata* + *F. mosseae* или *R. irregularis*, etc. [3, 5, 6] (с учетом изменений в таксономии¹⁷).

Среди абиотических факторов, помимо дефицита питательных веществ и воды, действие которых нивелирует микоризация, известны такие, как уплотнение почвы (в PMC *Zea mays* + *Glomus spp.*), высокое содержание тяжелых металлов (в PMC *Z. mays* + *Glomus spp.*, *Z. mays* + *Acaulospora laevis* или *F. mosseae*, *Helianthus annuus* + *F. mosseae* и *R. irregularis*, засоление (в PMC *Solanum*

Таблица 5. Общая характеристика инокулянтов по результатам тестирования на люцерне эффективности и активности грибов АМ

Table 5. General characteristics of inoculums based on black medic testing for efficiency and activity AM fungi

Штамм	Предполагаемый род гриба АМ*	Ускорение цветения люцерны	Эффективность гриба АМ	Активность гриба АМ
№ 38	<i>Acaulospora sp.</i>	нет	нет	низкая
№ 36	<i>Rhizophagus sp.</i>	нет	нет	низкая
№ 8	<i>Sclerocystis sp.</i>	нет	низкая	низкая
№ 6	<i>Entrophospora sp.</i>	нет	низкая	средняя
№ 3.3	<i>Funneliformis sp.</i>	нет	низкая	низкая
№ 11	<i>Rhizophagus sp.</i>	есть	низкая	низкая
№ 16	<i>Glomus sp.</i>	нет	средняя	низкая
№ 5	<i>Rhizophagus sp.</i>	нет	средняя	средняя
№ 76.4	<i>Nanoglomus sp.</i>	есть	высокая	средняя
№ 28	<i>Paraglomus sp.</i>	нет	высокая	высокая
№ 37	<i>Rhizophagus sp.</i>	нет	высокая	высокая
RCAM00320	<i>R. irregularis</i> **	есть	высокая	высокая

Примечание: предполагаемый род гриба АМ* — по морфологии спор; *R. irregularis*** — идентифицирован коллективом как *Rhizophagus irregularis* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüßler (ранее известный как CIAM8 *Glomus intraradices* Shenck&Smith).

lycopersicum + *F. mosseae*, *Z. mays* + *F. mosseae*, *Triticum aestivum* + *Glomus spp.*, *Glycine max* + *Entrophospora etunicata*) [5].

Таким образом, инокулянты на основе грибов АМ действительно могут занять важное место в совершенствовании техники почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия с целью усиления роста культурных растений и их адаптации к стресс-факторам [8, 9].

Выводы/Conclusions

Корреляционный анализ выявил отсутствие родоспецифичности грибов АМ в отношении формирования их симбиотической эффективности и активности. Тем не менее грибы с высокой эффективностью обладали, как правило, высокой встречаемостью микоризной инфекции (*F*) в корнях растения-хозяина.

По результатам оценки симбиотической эффективности и активности штаммов грибов АМ в условиях дефицита фосфора в почве можно рекомендовать штаммы № 28, 76.4, 37, RCAM00320 к полевой апробации как наиболее эффективные. Наряду с ними штаммы № 16, 5, обладающие средней эффективностью, заслуживают проверки эффективности на почвах с более высоким уровнем Рд, характерным для агроэкосистем, чтобы оценить устойчивость по параметрам их активности и эффективности к внесению удобрений.

Учитывая неспецифичность взаимодействия с видами растений в агроэкосистемах, перечисленные штаммы грибов АМ могут быть испытаны в качестве действующего начала в инокулянтах для повышения адаптации широкого спектра агрокультур к условиям засухи и другим абиотическим стресс-факторам среды.

¹⁷ AMF Species List. S.L. Stürmer (digital resource published online: 04 Apr 2025; accessed 01 Nov 2025). URL: <https://sites.google.com/view/cicg-furb-english/taxonomy/amf-species-list>

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 № 24-26-00181.

FUNDING

This research was funded by Russian Science Foundation No. 24-26-00181.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Hyde K.D. *et al.* The 2024 Outline of *Fungi* and fungus-like taxa. *Mycosphere*. 2024; 15(1): 5146–6239. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/15/1/25>
- Smith S.E., Read D.J. *Mycorrhizal symbiosis*. 3rd ed. New York: Academic Press. 2008; 787. ISBN 978-0-12-370526-6 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Augé R.M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*. 2001; 11(1): 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Evelin H., Kapoor R., Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany*. 2009; 104(7): 1263–1280. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp251>
- Nadeem S.M., Ahmad M., Zahir Z.A., Javaid A., Ashraf M. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*. 2014; 32(2): 429–448. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Tang H. *et al.* The Critical Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Improve Drought Tolerance and Nitrogen Use Efficiency in Crops. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 919166. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>
- Boorboori M.R., Lackóová L. Arbuscular mycorrhizal fungi and salinity stress mitigation in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 15: 1504970. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1504970>
- Wu S., Shi Z., Chen X., Gao J., Wang X. Arbuscular mycorrhizal fungi increase crop yields by improving biomass under rainfed condition: a meta-analysis. *PeerJ*. 2022; 10: e12861. <https://doi.org/10.7717/peerj.12861>
- Umer M. *et al.* Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*. 2025; 16: 1616273. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1616273>
- Yurkov A.P. *et al.* The Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Phosphorus Treatment on Root Metabolome of *Medicago lupulina* During Key Stages of Development. *Plants*. 2025; 14(17): 2685. <https://doi.org/10.3390/plants14172685>
- Юрков А.П., Лактионов Ю.В., Кожемяков А.П., Степанова Г.В. Анализ симбиотической эффективности бактериальных и грибных препаратов на кормовых культурах по данным урожайности семян. *Кормопроизводство*. 2017; (3): 16–21. <https://www.elibrary.ru/ygunsx>
- Юрков А.П., Кожемяков А.П., Степанова Г.В. Эффективность некоторых микробных биопрепаратов на основе бактерий и грибов арбускулярной микоризы. *Многофункциональное адаптивное кормопроизводство. Сборник научных трудов*. Москва. 2018; 19: 20–28. <https://www.elibrary.ru/yvotr>
- Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*. 1970; 55(1): 158–161, IN16–IN18. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V. Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes ayant une signification fonctionnelle. Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. (eds.). *Les Mycorhizes: physiologie et génétique*. Paris: INRA-Press. 1986; 217–221.
- Tawaray K. Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2003; 49(5): 655–668. <https://doi.org/10.1080/00380768.2003.10410323>
- Baum C., El-Tohamy W., Gruda N. Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Scientia Horticulturae*. 2015; 187: 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.002>
- Ефимова И.Л., Юрков А.П. Новые приемы агроэкологии для повышения качества посадочного материала яблони. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2015; 55: 73–77. <https://www.elibrary.ru/uzehij>

REFERENCES

- Hyde K.D. *et al.* The 2024 Outline of *Fungi* and fungus-like taxa. *Mycosphere*. 2024; 15(1): 5146–6239. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/15/1/25>
- Smith S.E., Read D.J. *Mycorrhizal symbiosis*. 3rd ed. New York: Academic Press. 2008; 787. ISBN 978-0-12-370526-6 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Augé R.M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*. 2001; 11(1): 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Evelin H., Kapoor R., Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany*. 2009; 104(7): 1263–1280. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp251>
- Nadeem S.M., Ahmad M., Zahir Z.A., Javaid A., Ashraf M. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*. 2014; 32(2): 429–448. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Tang H. *et al.* The Critical Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Improve Drought Tolerance and Nitrogen Use Efficiency in Crops. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 919166. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>
- Boorboori M.R., Lackóová L. Arbuscular mycorrhizal fungi and salinity stress mitigation in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 15: 1504970. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1504970>
- Wu S., Shi Z., Chen X., Gao J., Wang X. Arbuscular mycorrhizal fungi increase crop yields by improving biomass under rainfed condition: a meta-analysis. *PeerJ*. 2022; 10: e12861. <https://doi.org/10.7717/peerj.12861>
- Umer M. *et al.* Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*. 2025; 16: 1616273. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1616273>
- Yurkov A.P. *et al.* The Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Phosphorus Treatment on Root Metabolome of *Medicago lupulina* During Key Stages of Development. *Plants*. 2025; 14(17): 2685. <https://doi.org/10.3390/plants14172685>
- Yurkov A.P., Laktionov Yu.V., Kozhemyakov A.P., Stepanova G.V. Symbiotic efficiency of bacterial and fungal preparations for forage crops according to seed harvest. *Kormoproizvodstvo*. 2017; (3): 16–21 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ygunsx>
- Yurkov A.P., Kozhemyakov A.P., Stepanova G.V. Efficiency of some microbial biopreparations on the basis of bacteria and fungi of *Arbuscular mycorrhiza*. *Multifunctional adaptive fodder production. Collection of scientific papers*. Moscow. 2018; 19: 20–28 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yvotr>
- Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*. 1970; 55(1): 158–161, IN16–IN18. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V. Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes ayant une signification fonctionnelle. Gianinazzi-Pearson V., Gianinazzi S. (eds.). *Les Mycorhizes: physiologie et génétique*. Paris: INRA-Press. 1986; 217–221 (in French).
- Tawaray K. Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2003; 49(5): 655–668. <https://doi.org/10.1080/00380768.2003.10410323>
- Baum C., El-Tohamy W., Gruda N. Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Scientia Horticulturae*. 2015; 187: 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.002>
- Efimova I.L., Yurkov A.P. New methods of agric ecology to improve the quality of apple tree planting material. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2015; 55: 73–77 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/uzehij>

18. Кирпичников Н.А. и др. Эффективность фосфорных удобрений на периодически известкуемой почве при обработке семян ячменя и клевера биопрепаратами. *Агрохимия*. 2012; (11): 16–27. <https://www.elibrary.ru/pgsehj>

19. Крюков А.А., Кудряшова Т.Р., Беляева А.И., Горенкова А.И., Юрков А.П. Влияние инокуляции грибом *Rhizophagus irregularis* на экспрессию генов аквапоринов в корнях *Medicago lupulina* в условиях засухи. *Экологическая генетика*. 2025; 23(3): 263–275. <https://doi.org/10.17816/ecogen643544>

ОБ АВТОРАХ

Андрей Павлович Юрков¹

ведущий научный сотрудник,
кандидат биологических наук, доцент
ap.yurkov@arriam.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2231-6466>

Алексей Анатольевич Крюков¹

старший научный сотрудник,
кандидат биологических наук
aa.krukov@arriam.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8715-6723>

Татьяна Руслановна Кудряшова¹

инженер-исследователь,
кандидат биологических наук
t.kudryashova@arriam.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5120-7229>

Ангелина Ивановна Беляева¹

инженер-исследователь
angelkapustnikova@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0003-7535-9018>

Сергей Николаевич Никитин²

главный научный сотрудник,
доктор сельскохозяйственных наук
s_nikitin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6359-0955>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, шоссе Подбельского, 3, Пушкин, Санкт-Петербург, 196608, Россия

²Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.С. Немцева, ул. Институтская, 19, пос. Тимирязевский, Ульяновск, Ульяновская обл., 433315, Россия

18. Kirpichnikov N.A. *et al.* Effect of phosphorus fertilizers, lime materials, and biopreparations on barley and clover plants in a mixed plantation. *Agricultural Chemistry*. 2012; (11): 16–27 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pgsehj>

19. Kryukov A.A., Kudryashova T.R., Belyaeva A.I., Gorenkova A.I., Yurkov A.P. Effect of *Rhizophagus irregularis* inoculation on aquaporin gene expression in the roots of *Medicago lupulina* in drought conditions. *Ecological genetics*. 2025; 23(3): 263–275 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/ecogen643544>

ABOUT THE AUTHORS

Andrey Pavlovich Yurkov¹

Leading Researcher, Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor
ap.yurkov@arriam.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2231-6466>

Alexey Anatolievich Kryukov¹

Senior Researcher, Candidate
of Biological Sciences
aa.krukov@arriam.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8715-6723>

Tatiana Ruslanovna Kudryashova¹

Research Engineer, Candidate
of Biological Sciences
t.kudryashova@arriam.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5120-7229>

Angelina Ivanovna Belyaeva¹

Research Engineer
angelkapustnikova@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0003-7535-9018>

Sergey Nikolaevich Nikitin²

Chief Researcher, Doctor of Agricultural
Sciences
s_nikitin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6359-0955>

¹All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology, 3 Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608, Russia

²Samara Science Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Agricultural Scientific Research Institute, 19 Institutskaya St., Timiryazevsky settlement, Ulyanovsk, Ulyanovsk region, 433315, Russia

УДК 582.894.4:579.64:632.954

Научный обзор



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-99-109

И.И. Рассохина

С.В. Ерегина

Л.В. Сухарева

А.В. Платонов*✉

Вологодский научный центр
Российской академии наук, Вологда,
Россия

✉ platonov70@yandex.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2025

Одобрена после рецензирования: 28.12.2025

Принята к публикации: 25.01.2026

© Рассохина И.И., Ерегина С.В.,
Сухарева Л.В., Платонов А.В.

Микробиом борщевика как резервуар бактерий, обладающих биотехнологическим потенциалом (обзор)

РЕЗЮМЕ

В данном обзоре проведен анализ и обобщен отечественный и зарубежный опыт по изучению микроорганизмов, находящихся в ассоциации с *H. sosnowskyi*. Интерес к микроорганизмам связан с их способностью проявлять высокую ферментативную активность и синтезировать широкий спектр биологически активных соединений, таких как фитогормоны, антибиотики и ферменты-биокатализаторы. В этом контексте особый научный интерес представляет борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) — высокоинвазивный вид — адвент, демонстрирующий исключительную экологическую пластичность и способность к экспансивному распространению на обширных территориях. Феноменальная стрессоустойчивость этого растения, позволяющая ему успешно колонизировать нарушенные, загрязненные и маргинальные земли, при этом занимая доминирующее положение в формируемых фитоценозах, дает основания предположить, что ассоциированное с ним ризосферное и эндофитное микробное сообщество может обладать уникальными адаптивными и функциональными свойствами. Однако сегодня основной вектор внимания к *H. sosnowskyi* связан с его негативным влиянием как на здоровье человека (ожоги, дерматиты), так и на фитоценозы (снижение биоразнообразия). Работ, где в спектре внимания находился именно микробиом данного вида, крайне мало. В рамках проведенного обзора сделано заключение о перспективности использования и необходимости дополнительных исследований микробиома *H. sosnowskyi*, который представляет собой перспективный ресурс для выделения уникальных штаммов бактерий и грибов. Эти микроорганизмы, обладающие повышенной ферментативной активностью и способностью к синтезу биологически активных веществ, могут быть использованы для создания новых, высокоэффективных и экологичных биопрепаратов для повышения урожайности и устойчивости сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: борщевик Сосновского, микробиом, Нечерноземная зона России, стимулятор роста, биопрепарат

Для цитирования: Рассохина И.И., Ерегина С.В., Сухарева Л.В., Платонов А.В. Микробиом борщевика как резервуар бактерий, обладающих биотехнологическим потенциалом (обзор). *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 99–109.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-99-109>

Review



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-99-109

Irina I. Rassokhina

Svetlana V. Eregina,

Lyubov V. Sukhareva

Andrey V. Platonov ✉

Vologda Research Center of the
Russian Academy of Sciences,
Vologda, Russia

✉ platonov70@yandex.ru

Received by the editorial office: 15.10.2025

Accepted in revised: 28.12.2025

Accepted for publication: 25.01.2026

© Rassokhina I.I., Eregina S.V.,
Sukhareva L.V., Platonov A.V.

Hogweed microbiome as a reservoir of bacteria with biotechnological potential (review)

ABSTRACT

This review analyzes and summarizes Russian and foreign experience in the study of microorganisms associated with *H. sosnowskyi*. Interest in microorganisms is related to their ability to exhibit high enzymatic activity and synthesize a wide range of biologically active compounds such as phytohormones, antibiotics, and biocatalyst enzymes. In this context, Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden) is a highly invasive species of advent, demonstrating exceptional ecological plasticity and the ability to spread expansively over vast territories. The phenomenal stress resistance of this plant, which allows it to successfully colonize disturbed, polluted and marginal lands, while occupying a dominant position in the emerging phytocenoses, suggests that the rhizospheric and endophytic microbial community associated with it may have unique adaptive and functional properties. However, today the main vector of attention to *H. sosnowskyi* is related to its negative impact on human health (burns, dermatitis), and phytocenoses (reduced biodiversity). There are very few studies where the microbiome of this species was in the spectrum of attention. As part of the review, a conclusion was made about the prospects of using and the need for additional studies of the *H. sosnowskyi* microbiome, which is a promising resource for isolating unique strains of bacteria and fungi. These microorganisms, which have increased enzymatic activity and the ability to synthesize biologically active substances, can be used to create new highly effective and environmentally friendly biological products to increase crop yields and sustainability.

Key words: *Heracleum sosnowskyi*, microbiome, non-chernozem zone of Russia, growth stimulator, biopreparation

For citation: Rassokhina I.I., Eregina S.V., Sukhareva L.V., Platonov A.V. Hogweed microbiome as a reservoir of bacteria with biotechnological potential (review). *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 99–109 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-99-109>

Введение/Introduction

Современное высокопродуктивное сельское хозяйство неразрывно связано с применением удобрений и пестицидов¹, однако их нерациональное использование экологически небезопасно: ведет к деградации биоты агроценозов, персистенции в экосистемах и контаминации продуктов питания [1, 2]. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (FAO) подтверждает широкую распространенность остатков пестицидов в продовольствии [3] и продвигает альтернативные стратегии, прежде всего интегрированные системы защиты растений с акцентом на микробиологические подходы. Как отмечено в документах Codex Alimentarius, сокращение химической нагрузки сохраняет почвенную микробиоту, ответственную за плодородие, и формирует устойчивые агроэкосистемы².

Российская аграрная политика смещается в сторону экологизации и органического земледелия [4], что закреплено в ключевых стратегических документах^{3–6}. В них подчеркивается необходимость повышения урожайности сельскохозяйственных культур, сохранения плодородия почв, рационального землепользования и применения новых технологий.

Важным трендом современного сельского хозяйства стали внедрение и использование полифункциональных консорциумов микроорганизмов, проявляющих ферментативную активность и синтезирующих биологически активные соединения (фитогормоны, сидерофоры и др.) [5, 6]. Отметим, что в первую очередь ризосферные и эндофитные бактерии, имея тесные связи с растениями-хозяевами, способны оказывать на них значительное влияние за счет комплексного воздействия, улучшая их питание и защищая от болезней и вредителей [7–11].

Возрастающий интерес к биологическим средствам ведения сельского хозяйства, в том числе к биопрепаратам, обусловлен их экобезопасностью, селективностью и снижением рисков резистентности [12]. Динамика научных исследований подтверждает вышеуказанный тезис. Так, анализ международной базы PubMed выявил устойчивый рост публикаций по изучению действия биопрепаратов для агропроизводства: за 1990–1999 гг. найдены 52 работы, за 2000–2009 гг. — 53, за 2010–2019 гг. — 91, а за 2020–2024 гг. зафиксированы уже 111 работ, что свидетельствует о

возросшем международном интересе к данной проблематике. Аналогичная картина была выявлена и при анализе российской базы eLIBRARY.RU. Поиск по единовременному упоминанию «биопрепараты» и «рост растений» за 1990–1999 гг. выявил 5 работ, за 2000–2009 гг. — 144, за 2010–2019 гг. — 725, а за 2020–2024 гг. обнаружены свыше 570 работ.

Однако, несмотря на очевидный стратегический потенциал и соответствие общемировым трендам в агрономии, практическое внедрение биологических средств в отечественном растениеводстве сталкивается со значительными ограничениями. Анализ текущей ситуации показывает крайне ограниченный ассортимент биопрепаратов, официально разрешенных к применению и реально используемых в хозяйствах⁷. Особенно остро эта проблема стоит в регионах Европейского Севера России. Согласно результатам исследований⁸, доля сельскохозяйственных организаций на этой территории, применяющих биологические методы защиты растений (включая препараты на основе бактерий, грибов, вирусов, энтомофагов и феромонов), крайне мала — лишь 9,4%. Выявленное несоответствие между стратегическими установками на внедрение экологически безопасных технологий в АПК и их реальным проникновением в практику существенно повышает актуальность научных изысканий в данной сфере.

Насущной задачей становится комплекс фундаментально-прикладных исследований, направленных на:

- поиск и разработку новых высокоэффективных штаммов микроорганизмов и биологически активных соединений с адаптированным действием для условий Нечерноземной зоны России;
- оценку их эффективности и экологической безопасности в рамках полевых и производственных испытаний;
- разработку и оптимизацию технологий применения новых биопрепаратов в системах защиты растений и питания сельскохозяйственных культур;
- создание экономически обоснованных систем использования биологических препаратов и их внедрения в практику сельхозпредприятий различного масштаба.

При этом, как подчеркивают большинство специалистов в области агробиотехнологий, основным барьером на пути широкого внедрения и

¹ Жученко АА. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). М.: Агрорус. 2008; 1008.

² FAO. Agroecology: From Advocacy to Action: Information Document for the 14th Regular Session of the Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: FAO. 2015; 11 (CGRFA-14/15/Inf.18). URL: <https://www.fao.org/3/mj261e/mj261e.pdf>

³ Указ президента РФ от 28.02.2024 № 145.

⁴ Распоряжение Правительства РФ от 04.07.2023 № 1788-р.

⁵ Распоряжение Правительства РФ от 12.04.2020 № 993-р.

⁶ Указ президента РФ от 21.01.2020 № 20.

⁷ Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2023 [электронный ресурс]. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации [сайт]. URL: <https://mcx.gov.ru/ministry/departments/departament-rasteniyevodstva-mekhanizatsii-khimizatsii-i-zashchity-rasteniy/industry-information/info-dep-rast-gos-ysl-agrohim-arh-2023-god/>

⁸ Иванов В.А. Стратегия развития сельского хозяйства Европейского Севера России. 2023; 140.

успешного применения микробных препаратов в сельскохозяйственной практике остается их низкая колонизационная способность. Под этим понимается неспособность вносимых микроорганизмов не только прижиться в новой для них почвенной экосистеме, но и сформировать стабильную, жизнеспособную популяцию, способную оказывать длительное положительное воздействие на растения и почву. Это обусловлено комплексом взаимосвязанных причин. Во-первых, местные автохтонные микроорганизмы, которые на протяжении длительного времени адаптировались к специфическим условиям конкретного местообитания (кислотности, влажности, составу органики) и выстроили прочные, сбалансированные связи в микробном сообществе, вытесняют вносимых извне агентов, не оставляя им экологической ниши и доступа к питательным ресурсам. Во-вторых, сами абиотические условия территории (температурный режим, кислотность, влажность, тип и структура почвы) могут не соответствовать требуемым параметрам для эффективной жизнедеятельности тех штаммов, которые составляют основу препарата. В-третьих, даже при благоприятных изначальных условиях популяция вносимых микробов может быстро сократиться из-за отсутствия синергии с местным сообществом, что в итоге сводит на нет весь эффект и приводит к экономической нецелесообразности использования таких биопрепаратов [13–15].

В связи с этим исследования по поиску микроорганизмов с высокой адаптацией к условиям территории, где биопрепараты на их основе потенциально будут использоваться, — важная задача современной сельскохозяйственной микробиологии. При этом наибольший интерес могут представлять именно изоляты с высокой экологической пластичностью. Поиск таких штаммов возможен в микробиоме видов, которые обладают высокой пластичностью и способны успешно существовать в разнообразных условиях. Одним из широко известных таких видов является борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.).

Полезные свойства борщевиков известны с глубокой древности. Многие виды рода *Heracleum* используются как кормовые, пищевые, лекарственные, декоративные, красильные и медоносные растения⁹. В Советском Союзе были проведены многочисленные исследования биологических и химических особенностей видов данного рода флоры СССР¹⁰.

Одним из перспективных интродуцированных видов рода *Heracleum* в европейской части СССР был признан *Heracleum sosnowskyi* как растение, обладающее комплексом хозяйственно полезных признаков: высокая урожайность зеленой массы, быстрое отрастание, хорошая силосуемость [16, 17]. Однако после внедрения

и активного использования в реальных условиях хозяйствования выяснилось, что изначальная перспективность борщевика была переоценена (сок вызывает ожоги у человека и животных, поедание силоса из борщевика снижает здоровье и воспроизводительные качества коров, молоко приобретает горьковатый привкус, способность к сквашиванию снижается) [18, 19].

Интерес к данной культуре постепенно затих, сельхозугодья, занятые борщевиком, оказались заброшенными и пришли в негодность. Ввиду невостребованности и отсутствия контроля за посевами *H. sosnowskyi* вышел за границы центров возделывания и к настоящему времени значительно расширил ареалы своего существования [20].

Борщевик Сосновского, представляющий собой высокоинвазивный адвентивный вид, в настоящее время демонстрирует исключительную экологическую пластичность и способность к экспансивному распространению на обширных территориях, включая значительную часть Российской Федерации, в особенности Нечерноземную зону [20, 21]. Так, наиболее широкое распространение борщевика Сосновского отмечено в Северо-Западном регионе [22, 23], Республике Коми [24–26], в Средней России [27–30], а также в Сибири и на Дальнем Востоке [31–33].

Выдающаяся стрессоустойчивость данного вида, проявляющаяся в успешной колонизации нарушенных и маргинальных земель, а также его доминирование в формируемых фитоценозах позволяют предположить, что ассоциированное с ним микробное сообщество (ризосферный и эндофитный микробиом) может обладать уникальными адаптивными и функциональными свойствами. Эти свойства представляют значительный научно-прикладной интерес для выделения штаммов агрономически ценных бактерий, таких как ризобактерии, стимулирующие рост растений (PGPR), или агентов биоконтроля фитопатогенов.

Цель работы — провести системный анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта по изучению микроорганизмов, находящихся в ассоциации с *H. sosnowskyi*.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Отбор и систематический обзор научной литературы были выполнены в результате поиска в научных электронных библиотеках и поисковых системах: eLIBRARY.RU, PubMed и Google Scholar. Ключевые слова при работе с указанными базами: *Heracleum*, *Heracleum sosnowskyi*, борщевик Сосновского, микробиом. Ограничений по году издания или типам публикаций не указывалось. При анализе публикаций на начальном этапе проводили просмотр только заголовков и аннотаций, в дальнейшем — анализ полных текстов отобранных статей.

⁹ Интродукция борщевиков в Белоруссии. Минск: Наука и техника. 1980; 200.

¹⁰ Сациперова И.Ф., Борщевники флоры СССР — новые кормовые растения. Л.: Наука. 1984; 223.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Интерес мирового научного сообщества к борщевiku Сосновского. Анализ базы PubMed по запросу *Heracleum* на начало 2025 года выявил всего 337 публикаций. Первая публикация датируется 1928 годом и посвящена изучению жиров семян зонтичных растений на примере вида *Heracleum sphondylium* [34]. Массив публикаций 1947–1996 гг. преимущественно затрагивает вопросы дерматитов, которые способны вызывать гигантские борщевики, а также содержания кумаринов и эфирных масел в различных органах. В 1986–2006 гг. больший акцент наблюдался в сторону изучения вторичных метаболитов, при этом с 1970 года более выраженным становится интерес к строению и составу белков борщевика [35, 36].

Отметим, что первая работа, затрагивающая возможность использования растений данного рода в качестве противомикробного агента, опубликована в 1994 году, где была проведена оценка противогрибковой активности 100 растительных экстрактов, в том числе метанольного экстракта из корней *Heracleum lanatum* [37]. В настоящее время данное направление изучения представителей рода *Heracleum* продолжается и может быть перспективно для применения в фармацевтике, фармакологии и медицине. Например, в работе Segneau et al. (2024) отмечена возможность создания нового простого фитоносителя (система HS-Ag), который представляет собой включение наночастиц серебра в поры растительного матрикса *H. sphondylium* [38].

Противомикробные и антиоксидантные свойства могут представлять весомый интерес для применения и в пищевой промышленности. Отмечено, что при добавлении эфирного масла *Heracleum lasiopetalum* в раствор слизи семян *Lepidium sativum* можно получить новое съедобное покрытие, которое способно повысить срок годности и качество говядины [39].

Аналогичные результаты показаны в работе Mohebi et al. (2023), где продемонстрирована возможность создания биоматериала на основе хитозан-желатиновых нановолокон, инкапсулированных экстрактом *Heracleum persicum* и эфирным маслом *Ziziphora clinopodioides* для повышения срока хранения и качества колбасных изделий [40]. Использование эфирного масла данного вида гигантских борщевиков возможно и с целью повышения сроков годности сыра и филе рыбы [41, 42].

Популяционные исследования гигантских борщевиков начинаются с 2003 года. Так, в работе Walker et al. (2003) выявлена высокая вариабельность между популяциями *Heracleum mantegazzianum* из разных водосборов Великобритании, что может указывать на большую исходную популяцию борщевика на момент интродукции или на множественные интродукции [43].

Сравнительная оценка популяции *H. mantegazzianum* в двух разных сообществах и на двух разных участках показала, что в инвазивных сообществах на неуправляемых участках особи зацветали раньше. При этом репродуктивная способность отдельных растений не была связана ни с плотностью популяции, ни с возрастом цветения [44].

Интерес к микробиому борщевика начинает формироваться в 2004 году [45], показано существенное микоразнообразие различных родов и видов на отмерших стеблях *H. mantegazzianum*. Однако лишь в 2011 году опубликованы исследования о перспективном штамме для агропроизводства, который был выделен из тканей борщевика [46]. С 2017 года исследования данного рода всё чаще затрагивают проблему неконтролируемого и массового распространения гигантских борщевиков [24, 47, 48]. Например, в работе Shackleton et al. (2020) проведен непрерывный мониторинг распространения *H. mantegazzianum* в Швейцарии, показаны потенциальное распространение и экологические механизмы его инвазии [49].

Важное место занимают работы, затрагивающие трансформацию сообществ, где наблюдается инвазия представителей гигантских борщевиков. Так, например, в исследованиях Renčo et al. (2021) показано, что внедрение в сообщества *H. mantegazzianum* повышало кислотность почвы, снижало содержание углерода и азота, сокращало количество и площадь покрытия местных видов растений, а также влияло на структуру сообществ нематод (увеличивалась общая численность нематод, при этом численность всеядных нематод снижалась, а фитопаразитических — возрастала) [50].

Особое место занимают работы, в которых предполагается использовать представителей гигантских борщевиков для повышения продуктивности различных животных. Например, в работе Javandel et al. (2019) показано, что внедрение в рацион порошка *H. persicum* повышало прирост массы тела, коэффициент конверсии корма, а также положительно влияло на микробиоту кишечника цыплят-бройлеров [51].

Количество публикаций, выявленных в базе PubMed по запросу *Heracleum sosnowskyi* на начало 2025 года, всего 30. Первые материалы датируются 1966 годом и посвящены изучению химического состава эфирного масла борщевика Сосновского [52].

Основная масса публикаций, затрагивающих данный вид гигантских борщевиков, берет свое начало в 2011 году. Преимущественно они касаются изучения химического состава, прежде всего вторичных метаболитов, различных органов и тканей борщевика Сосновского, влияния данных веществ на здоровье населения, а с 2017 года — вопроса распространения вида [53] и способов снижения его жизнеспособности. Так, в работе

Żalnierius *et al.* (2022) показано угнетающее действие экзогенной гиббереллиновой кислоты на развитие плодов *H. sosnowskyi* и их способность прорасти в полевых условиях [54].

Интерес российского научного сообщества к гигантским борщевикам. Анализ базы eLIBRARY.RU по запросу *Heracleum* на начало 2025 года выявил 3898 публикаций, а при дополнительном запросе «микробиом» — всего 9. При этом отметим, что лишь одна публикация, которая несла обзорный характер, действительно была посвящена микробиому борщевика. С учетом единовременного запроса *Heracleum* и «микроорганизмы» количество публикаций в анализируемой базе достигало 23. Дата первой из выявленных публикаций приходится на 2015 год и затрагивает аллелопатическое действие сока борщевика на бактерии родов *Bacillus*, *Sarcina* и *Streptomyces* [55], а первая публикация, которая направлена на изучение ростостимулирующего растения действия штамма, выделенного из микробиома борщевика, была опубликована в 2016 году [56]. Отметим, что среди 23 выявленных публикаций лишь 3 посвящены микробиому борщевика и (или) почвам под ним, 4 — его ресурсной оценке, 8 — вопросам его экологии и биологии.

Ресурсный потенциал *H. sosnowskyi*. При уточнении поискового запроса *Heracleum* в базе eLIBRARY.RU формулировкой «использование» были выявлены 15 публикаций, из них лишь 7 соответствовали цели поиска.

Как отмечают некоторые исследователи, борщевик может представлять интерес для получения из его массы биотоплива [57], топливных гранул [58, 59], целлюлозы для частичной замены древесного сырья при производстве внутренних слоев упаковочного картона [60], получения растительных пластиков без связующего [61], использования в качестве добавки для создания бетонного композита [62], эфирных масел, пектинов и биологически активных веществ [16, 63] и др.

Однако Н.Н. Лунаева (2024 г.), проводя анализ предложенных альтернативных способов использования биомассы борщевика, отмечает нерентабельность данных решений. Она говорит, что сырье данного вида доступно лишь в условиях его неконтролируемого и неизымаемого состояния, при этом территориальное расположение сообществ борщевика вызовет ряд трудностей по его добыче и транспортировке.

Таким образом, целесообразный единственный способ получения сырья — возврат борщевика в статус сельскохозяйственной культуры и возделывания его на высоком уровне агротехники, что невозможно (сегодня данный вид относится к категории сорных растений, представляет угрозу для биоразнообразия и здоровья населения) и неразумно (эффективность предложенных альтернативных методов вызывает вопросы) [64]. При этом всё же стоит иметь в виду, что химический состав *H. sosnowskyi* имеет существенный

потенциал для различных отраслей промышленности: сахароза, пектиновые вещества, целлюлоза, карбоновые кислоты, альдегиды, спирты, кумарины и фурукумарины и пр. [65].

Основной ресурсный интерес к *H. sosnowskyi* в настоящее время обоснован высоким содержанием разнообразных химических веществ. Например, липидные экстракты данного вида гигантских борщевиков проявляют высокую антимикробную активность и цитотоксическую активность в отношении линий раковых клеток, поэтому растительная биомасса после эрадикации может быть использована для получения веществ с высоким потенциалом применения в биофармацевтической промышленности [66].

Поиск важных для агропроизводства бактерий в микробиоме *H. sosnowskyi*. Учитывая широту распространения борщевика Сосновского в Нечерноземной зоне России, где природно-климатические условия затрудняют возделывание сельскохозяйственных культур и требуют как внесения дополнительного питания, так и использование средств защиты растений, данный объект является перспективным для поиска в его микробиоме ценных для агропроизводства бактерий. В первую очередь интерес к данному виду связан с высокой экологической пластичностью самого борщевика и, возможно, его микробиома.

Инвазия *H. sosnowskyi* оказывает влияние на химический состав почвы. Так, имеются данные, что почвы, взятые из зарослей борщевика, имеют пониженное (относительно лугового сообщества без инвазий борщевика) содержание углерода, азота, калия и нитратного азота [67, 68], что объясняется отсутствием нижнего яруса в инвазивных зарослях борщевика из-за сильного затенения и аллелопатического воздействия самим борщевиком.

Однако исследования другого авторского коллектива [69] отмечают противоположную картину: экспансия *H. sosnowskyi* повышает в верхнем почвенном горизонте содержание органического углерода, азота, подвижных форм фосфора и калия, обменного кальция. Такой эффект объясняется поступлением с растительным опадом борщевика значительного количества органического материала, богатого зольными элементами и быстроминерализуемого почвенной микробиотой.

Отмечено, что инвазия борщевика изменяет структуру почвенных микробиомных комплексов: происходит увеличение родового и видового разнообразия актинобиоты [70]. В почве под моносообществами борщевика Сосновского в сравнении с соседними луговыми сообществами отмечена большая доля олиготрофных микроорганизмов [68]. Кроме того, в ризосфере и ризоплане борщевика Сосновского, прежде всего в начале его онтогенеза, выявлена большая плотность микроорганизмов в сравнении с почвой, свободной от корней. Вероятно, микромицеты принимают

активное участие в прорастании семян и на начальных этапах вегетации растений [71].

В исследованиях 2019 года авторский коллектив при участии Е.В. Товстик отмечает, что почвы, взятые под *H. sosnowskyi*, включали в состав своего биома актиномицеты с бактерицидной, антифунгальной и комплексной активностями. Так, у 55–60% штаммов был обнаружен антагонизм против *Pseudomonas putid*, у 25% — против *Erwinia herbicola*, у 10% — в отношении фитопатогенных грибов родов *Fusarium*, *Ulocladium*, *Alternaria*, *Trichoderma*. Кроме того, 5–10% штаммов синтезировали ИУК, 85–90% обладали целлюлолитической активностью.

Проанализированный почвенный микробиом из-под борщевика оказался перспективным для выделения штаммов как для защиты растений от фитопатогенных грибов из родов *Fusarium*, *Ulocladium*, *Alternaria*, *Trichoderma* и бактерий *Pseudomonas putida*, *Erwinia herbicola* (1N8, 1K6, 3K9), так и для стимуляции роста растений (1K6, 3N6, 3K8), а также для биоконверсии трудноразлагаемых отходов растениеводства (1N7, 1K8, 1K10, 3K9) [72]. Таким образом, Е.В. Товстик и соавт. демонстрируют, что микробиом сообществ с высоким уровнем инвазии *H. sosnowskyi* уникален (в сравнении с окружающими луговыми ценозами), а также может быть интересен с точки зрения высокой активности и участия микроорганизмов в прорастании и жизнедеятельности связанных с ними растений борщевика, с одной стороны, и проявления важных для агропроизводства свойств штаммами — с другой.

Эффективность поиска агрономически ценных штаммов в микробиоме *H. sosnowskyi* подтверждается результатами независимых исследований. Так, штамм *Bacillus subtilis* HC8, изолированный из тканей гигантского борщевика, выросшего на территории Ленинградской области, продемонстрировал выраженный ростостимулирующий и протективный эффект.

В работе [56] показано, что инокуляция данным штаммом способствовала увеличению массы корней редиса на 42%, а салата — на 15%. Параллельно штамм проявлял антифунгальную активность в отношении ряда фитопатогенов, включая *Aspergillus niger*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* и *Pythium ultimum* [46]. Изучение механизма

действия показало, что штамм продуцирует гиббереллины и липопептидные антибиотики, а также обладает целлюлазной, глюканазной и протеазной активностью, что в совокупности объясняет его комплексное положительное воздействие на растения [46, 56].

Выводы/Conclusions

Проведенный системный анализ литературы выявил, что, несмотря на длительную историю изучения рода *Heracleum*, микробиом борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*) остается крайне слабо исследованным направлением. Несмотря на тысячи публикаций, посвященных в основном его инвазивности, химическому составу и негативному воздействию, работ, целенаправленно изучающих ассоциированные с ним микроорганизмы, насчитываются единицы. Вместе с тем феноменальная экологическая пластичность, стрессоустойчивость и способность этого вида к доминированию в фитоценозах служат веским основанием для гипотезы о том, что его ризосферный и эндофитный микробиом обладает уникальным адаптивным и функциональным потенциалом.

Результаты обзора подтверждают высокую перспективность данного направления для сельскохозяйственной биотехнологии. Имеющиеся единичные исследования демонстрируют, что микробиом *H. sosnowskyi* является резервуаром штаммов бактерий и актинобактерий, проявляющих широкий спектр агрономически ценных свойств: стимуляцию роста растений (PGPR-активность, синтез ИУК), антифунгальную и антибактериальную активность в отношении фитопатогенов, а также целлюлолитическую активность. Успешный пример выделения и применения штамма *Bacillus subtilis* HC8, который значительно повышал продуктивность сельскохозяйственных культур, служит убедительным доказательством практической значимости этих изысканий.

Таким образом, углубленное изучение микробиома борщевика Сосновского представляется стратегически важной задачей для создания новых, высокоэффективных и адаптированных к условиям Нечерноземной зоны России биопрепаратов, способствующих экологизации и устойчивому развитию агропромышленного комплекса.

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 поддержке гранта Российского научного фонда № 25-26-00204 «Биотехнологические потенциал микробиома *Heracleum sosnowskyi* Manden для агропроизводства Нечерноземной зоны России». <https://rscf.ru/project/25-26-00204/>

FUNDING

The reported study was funded by study the Russian Science Foundation, grant No. 25-26-00204 "Biotechnological potential of the *Heracleum sosnowskyi* Manden microbiome for agricultural production in the Non-Black Earth Zone of Russia". <https://rscf.ru/project/25-26-00204/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Goulson D., Nicholls E., Botías C., Rotheray E.L. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*. 2015; 347(6229): 1255957. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>
2. Damalas C.A., Eleftherohorinos I.G. Pesticide Exposure, Safety Issues, and Risk Assessment Indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2011; 8(5): 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
3. Максимов И.В., Абизгильдина Р.Р., Пусенкова Л.И. Стимулирующие рост растений микроорганизмы как альтернатива химическим средствам защиты от патогенов (обзор). *Прикладная биохимия и микробиология*. 2011; 47(4): 373–385. EDN NYGBNH
4. Коршунов С.А., Любовецкая А.А., Асатулова А.М., Исмаилов В.Я., Коноваленко Л.Ю. Закон об органической продукции есть: что меняется в России? *Контроль качества продукции*. 2019; (12): 25–31. EDN EYSUU
5. Knežević M. et al. Potential of root nodule nonrhizobial endophytic bacteria for growth promotion of *Lotus corniculatus* L. and *Dactylis glomerata* L. *Journal of Applied Microbiology*. 2021; 131(6): 2929–2940. <https://doi.org/10.1111/jam.15152>
6. Maitra S. et al. Bioinoculants — Natural Biological Resources for Sustainable Plant Production. *Microorganisms*. 2021; 10(1): 51. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>
7. Compant S., Clément C., Sessitsch A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010; 42(5): 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024>
8. Hardoim P.R. et al. The Hidden World within Plants: Ecological and Evolutionary Considerations for Defining Functioning of Microbial Endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2015; 79(3): 293–320. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00050-14>
9. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*. 2009; 63: 541–556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
10. Рассохина И.И. Использование микроорганизмов как средство повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур. *АгроЗооТехника*. 2021; 4(3): 2. <https://doi.org/10.15838/alt.2021.4.3.2>
11. Рассохина И.И. Потенциал бактерий рода *Pseudomonas* для использования в растениеводстве. *АгроЗооТехника*. 2024; 7(3): 3. <https://doi.org/10.15838/alt.2024.7.3.3>
12. Петров В.Б., Чеботарь В.К., Казаков А.Е. Микробиологические препараты в биологизации земледелия России. *Достижения науки и техники АПК*. 2002; (10): 16–20. EDN YHBNV
13. Воробейков Г.А. и др. Исследование эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в посевах различных видов растений. *Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена*. 2011; 141: 114–123. EDN OFUWNF
14. Кожемяков А.П. Перспективы эффективного применения земледобрильных биопрепаратов в земледелии и растениеводстве. *Перспективы использования инновационных форм удобрений, средств защиты и регуляторов роста растений в агротехнологиях сельскохозяйственных культур. Материалы докладов участников 9-й научно-практической конференции «Анапа-2016»*. Анапа. 2016; 81–83. EDN ZAHDLX
15. Воробейков Г.А. Действие ассоциативных ризобактерий (PGPR) на растения в зависимости от дозы минерального азота. *Механизмы адаптации микроорганизмов к различным условиям среды обитания. Тезисы докладов 2-й Всероссийской научной конференции с международным участием*. Иркутск. 2022; 232–235. EDN LQTPIN
16. Ткаченко К.Г. Род борщевик (*Heracleum* L.) — хозяйственно полезные растения. *Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Наука о Земле*. 2014; (4): 27–33. EDN THPRJH
17. Ozerova N.A. Vectors of *Heracleum sosnowskyi* Manden. Invasion on the territory of Moscow region: history and modernity (as exemplified by the Shakhovskaya Urban District). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 867: 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012074>

REFERENCES

1. Goulson D., Nicholls E., Botías C., Rotheray E.L. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*. 2015; 347(6229): 1255957. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>
2. Damalas C.A., Eleftherohorinos I.G. Pesticide Exposure, Safety Issues, and Risk Assessment Indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2011; 8(5): 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
3. Maksimov I.V., Abizgildina R.R., Pusenkov L.I. Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2011; 47(4): 333–345. <https://doi.org/10.1134/S0003683811040090>
4. Korshunov S.A., Lyubovedskaya A.A., Asaturova A.M., Ismailov V.Ya., Konovalev L.Yu. The law on organic products is in place: what is changing in Russia?. *Product quality control*. 2019; (12): 25–31 (in Russian). EDN EYSUU
5. Knežević M. et al. Potential of root nodule nonrhizobial endophytic bacteria for growth promotion of *Lotus corniculatus* L. and *Dactylis glomerata* L. *Journal of Applied Microbiology*. 2021; 131(6): 2929–2940. <https://doi.org/10.1111/jam.15152>
6. Maitra S. et al. Bioinoculants — Natural Biological Resources for Sustainable Plant Production. *Microorganisms*. 2021; 10(1): 51. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010051>
7. Compant S., Clément C., Sessitsch A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010; 42(5): 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024>
8. Hardoim P.R. et al. The Hidden World within Plants: Ecological and Evolutionary Considerations for Defining Functioning of Microbial Endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2015; 79(3): 293–320. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00050-14>
9. Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*. 2009; 63: 541–556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
10. Rassokhina I.I. The Use of Microorganisms as a Means to Increase Productivity and Sustainability of Agricultural Crops. *Agricultural and Livestock Technology*. 2021; 4(3): 2 (in Russian). <https://doi.org/10.15838/alt.2021.4.3.2>
11. Rassokhina I.I. The potential of *Pseudomonas* bacteria for the use in crop production. *Agricultural and Livestock Technology*. 2024; 7(3): 3 (in Russian). <https://doi.org/10.15838/alt.2024.7.3.3>
12. Petrov V.B., Chebotar V.K., Kazakov A.E. Microbiological preparations in the biologization of Russian agriculture. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2002; (10): 16–20 (in Russian). EDN YHBNV
13. Vorobeykov G.A. et al. A study of associative rhizobacteria efficiency for economic plants. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2011; 141: 114–123 (in Russian). EDN OFUWNF
14. Kozhemyakov A.P. Prospects for the Effective Use of Biofertilizers in Agriculture and Crop Production. *Prospects for the Use of Innovative Fertilizers, Plant Protection Products, and Plant Growth Regulators in Agricultural Crops. Proceedings of the 9th Scientific and Practical Conference "Anapa-2016"*. Anapa. 2016; 81–83. EDN ZAHDLX
15. Vorobeykov G.A. Effect of associative rhizobacteria (PGPR) on plants depending on the dose of mineral nitrogen. *Mechanisms of microorganism adaptation to various environmental conditions. Abstracts of the Second All-Russian scientific conference with international participation*. Irkutsk. 2022; 232–235 (in Russian). EDN LQTPIN
16. Tkachenko K.G. *Heracleum* L. genus — economic plants. *Bulletin of Udmurt University. Series: Biology. Earth Sciences*. 2014; (4): 27–33 (in Russian). EDN THPRJH
17. Ozerova N.A. Vectors of *Heracleum sosnowskyi* Manden. Invasion on the territory of Moscow region: history and modernity (as exemplified by the Shakhovskaya Urban District). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 867: 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012074>

18. Захаров А.Г., Воронова М.И., Суров О.В., Рублева Н.В., Лебедева Е.О. Характеристика целлюлозы и нанокристаллической целлюлозы, полученных из лигноцеллюлозной массы борщевика Сосновского. *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. Сборник материалов XXIII Международного научно-практического форума SMARTEX-2020*. Иваново. 2020; 177–181. https://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_177
19. Симонова А.Ю. и др. Фотохимический дерматит вследствие контакта с соком борщевика Сосновского. *Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь»*. 2020; 9(4): 653–658. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2020-9-4-653-658>
20. Озерова Н.А., Кривошеина М.Г. Особенности формирования вторичных ареалов борщевиков Сосновского и Мантегацци (*Heracleum Sosnowskyi*, *H. mantegazzianum*) на территории России. *Российский журнал биологических инвазий*. 2018; 11(1): 78–87. EDN YSIMFP
21. Абрамова Л.М. Новые данные по биологическим инвазиям чужеродных видов в Республике Башкортостан. *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2014; 19(4): 16–27. EDN TDWUXH
22. Антипина Г.С., Шуйская Е.А. Семенная продуктивность инвазионного вида борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) в Южной Карелии. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2009; (5): 23–25. EDN JZFWWT
23. Гельтман Д.В., Бузунова И.О., Конечная Г.Ю. Состав и эколого-фитоценоотические особенности сообществ с участием инвазионного вида *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae) на северо-западе Европейской России. *Растительные ресурсы*. 2009; 45(3): 68–75. EDN OINRWZ
24. Chadin I. et al. Distribution of the invasive plant species *Heracleum sosnowskyi* Manden in the Komi Republic (Russia). *PhytoKeys*. 2017; 77: 71–80. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.77.11186>
25. Чадин И.Ф., Дальке И.В., Малышев Р.В. Оценка морозостойкости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) после удаления снежного покрова в ранневесенний период. *Российский журнал биологических инвазий*. 2018; 11(4): 105–116. EDN YPPAUX
26. Dalke I.V. et al. Traits of *Heracleum sosnowskyi* Plants in Monostand on Invaded Area. *PLOS One*. 2015; 10(11): e0142833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142833>
27. Богданов В.Л., Николаев Р.В., Шмелева И.В. Инвазия экологически опасного растения борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) на территории европейской части России. *Региональная экология*. 2011; (1–2): 43–52. EDN TWHUIN
28. Панасенко Н.Н. Некоторые вопросы биологии и экологии борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden). *Российский журнал биологических инвазий*. 2017; 10(2): 95–106. EDN YUQJZ
29. Панасенко Н.Н., Куликова Е.Я., Харин А.В., Ивенкова И.М. Сообщества растений-трансформеров: ассоциация *Urtica dioica* — *Heracleum sosnowskyi*. *Бюллетень Брянского отделения Русского ботанического общества*. 2014; (2): 48–53. EDN TBCLVZ
30. Широкова В.А., Озерова Н.А. Инвазия эндемика Кавказа борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*) в экосистемы пойм рек Европейской равнины. *Грозненский естественно-научный бюллетень*. 2016; (4): 66–78. EDN YHQAUV
31. Абрамова Л.М., Голованов Я.М., Рогожникова Д.Р. Борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden, Apiaceae) в Башкортостане. *Российский журнал биологических инвазий*. 2021; 14(1): 2–12. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-1-2-12>
32. Смирнов А.А., Корнева И.Г. Последствия интродукции *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae) на Сахалине. *Растительные ресурсы*. 2010; 46(2): 18–23. EDN OIQQRX
33. Chernjagina O.A., Devjatova E.A., Shtreker L., Abramova L.M. Problema di infestazione *Heracleum sosnowskyi* Manden Kamchatka. *Italian Science Review*. 2014; (3): 420–423. EDN SICEED
34. Hilditch T.P., Jones E.E. Seed fats of the Umbelliferae: *Heracleum sphondylium* and *Angelica sylvestris*. *Biochemical Journal*. 1928; 22(2): 326–330. <https://doi.org/10.1042/bj0220326>
35. Hart J.W., Sabnis D.D. Colchicine-binding protein from phloem and xylem of a higher plant. *Planta*. 1973; 109(2): 147–152. <https://doi.org/10.1007/BF00386122>
18. Zakharov A.G., Voronova M.I., Surov O.V., Rubleva N.V., Lebedeva E.O. Characterization of cellulose and nanocrystalline cellulose produced from lignocellulose mass of *Heracleum Sosnowskyi*. *Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials. Collection of materials of the XXIII International scientific and practical forum SMARTEX-2020*. Ivanovo. 2020; 177–181 (in Russian). https://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_177
19. Simonova A.Yu. et al. Photochemical Dermatitis Due to Contact With *Sosnovsky Hogweed*. *Russian Sklifosovsky Journal "Emergency Medical Care"*. 2020; 9(4): 653–658. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2020-9-4-653-658>
20. Ozerova N.A., Krivosheina M.G. Patterns of Secondary Range Formation for *Heracleum sosnowskyi* and *H. mantegazzianum* on the Territory of Russia. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2018; 9(2): 155–162. <https://doi.org/10.1134/S2075111718020091>
21. Abramova L.M. New data on biological invasions of alien species in the Republic of Bashkortostan. *Herald of the Academy of sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2014; 19(4): 16–27 (in Russian). EDN TDWUXH
22. Antipina G.S., Shuiskaya E.A. Seed production of invasive species *sosnowskyi's* cow-parsonip (*Heracleum Sosnowskyi* [sic!]). *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2009; (5): 23–25 (in Russian). EDN JZFWWT
23. Geltman D.V., Buzunova I.O., Konechnaya G.Yu. Plant communities with the invasive species *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae) in the North-West of European Russia. *Vegetation Resources*. 2009; 45(3): 68–75 (in Russian). EDN OINRWZ
24. Chadin I. et al. Distribution of the invasive plant species *Heracleum sosnowskyi* Manden in the Komi Republic (Russia). *PhytoKeys*. 2017; 77: 71–80. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.77.11186>
25. Chadin I.F., Dalke I.V., Malyshev R.V. Evaluation of *Heracleum sosnowskyi* Frost Resistance after Snow Cover Removal in Early Spring. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2019; 10(1): 83–91. <https://doi.org/10.1134/S2075111719010041>
26. Dalke I.V. et al. Traits of *Heracleum sosnowskyi* Plants in Monostand on Invaded Area. *PLOS One*. 2015; 10(11): e0142833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142833>
27. Bogdanov V.L., Nikolayev R.V., Shmeleva I.V. Invasion of the environmentally hazardous plant *sosnowsky's* hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden) in the European part of Russia. *Regional ecology*. 2011; (1–2): 43–52 (in Russian). EDN TWHUIN
28. Panasenkov N.N. On certain issues of biology and ecology of *sosnowsky's* hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden). *Russian Journal of Biological Invasions*. 2017; 8(3): 272–281. <https://doi.org/10.1134/S2075111717030110>
29. Panasenkov N.N., Kulikova E.Ya., Kharin A.V., Ivenkova I.M. Communities of plants-trasformers: association *Urtica dioicae* — *Heracleum sosnowskyi*. *Bulletin of Bryansk Department of Russian botanical society*. 2014; (2): 48–53 (in Russian). EDN TBCLVZ
30. Shirokova V.A., Ozerova N.A. Invasion of the caucasian endemic *sosnowsky's* hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) into river-floodplain ecosystems of the European plain. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2016; (4): 66–78 (in Russian). EDN YHQAUV
31. Abramova L.M., Golovanov Ya.M., Rogozhnikova D.R. *sosnowsky's* Hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden, Apiaceae) in Bashkortostan. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2021; 12(2): 127–135. <https://doi.org/10.1134/S2075111721020028>
32. Smirnov A.A., Korneva I.G. Consequences of *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae) introduction at Sakhalin island. *Vegetation Resources*. 2010; 46(2): 18–23 (in Russian). EDN OIQQRX
33. Chernjagina O.A., Devjatova E.A., Shtreker L., Abramova L.M. Problema di infestazione *Heracleum sosnowskyi* Manden Kamchatka. *Italian Science Review*. 2014; (3): 420–423 (in Italian). EDN SICEED
34. Hilditch T.P., Jones E.E. Seed fats of the Umbelliferae: *Heracleum sphondylium* and *Angelica sylvestris*. *Biochemical Journal*. 1928; 22(2): 326–330. <https://doi.org/10.1042/bj0220326>
35. Hart J.W., Sabnis D.D. Colchicine-binding protein from phloem and xylem of a higher plant. *Planta*. 1973; 109(2): 147–152. <https://doi.org/10.1007/BF00386122>

36. O'Brien T.P., McCully M.E. Cytoplasmic fibres associated with streaming and saltatory-particle movement in *Heracleum mantegazzianum*. *Planta*. 1970; 94(1): 91–94. <https://doi.org/10.1007/BF00386612>
37. McCutcheon A.R., Ellis S.M., Hancock R.E.W., Towers G.H.N. Antifungal screening of medicinal plants of British Columbian native peoples. *Journal of Ethnopharmacology*. 1994; 44(3): 157–169. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(94\)01183-4](https://doi.org/10.1016/0378-8741(94)01183-4)
38. Segneanu A.-E. et al. Insight into Romanian Wild-Grown *Heracleum sphondylium*: Development of a New PhytocARRIER Based on Silver Nanoparticles with Antioxidant, Antimicrobial and Cytotoxicity Potential. *Antibiotics*. 2024; 13(9): 911. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13090911>
39. Barzegar H., Alizadeh Behbahani B., Mehrnia M.A. Quality retention and shelf life extension of fresh beef using *Lepidium sativum* seed mucilage-based edible coating containing *Heracleum lasiopetalum* essential oil: an experimental and modeling study. *Food Science and Biotechnology*. 2020; 29(5): 717–728. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00715-4>
40. Mohebi E., Abbasvali M., Shahbazi Y. Development of biomaterials based on chitosan-gelatin nanofibers encapsulated with *Ziziphora clinopodioides* essential oil and *Heracleum persicum* extract for extending the shelf-life of vacuum-cooked beef sausages. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 253(6): 127258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127258>
41. Rajaei Lak H., Bazargani-Gilani B., Karami M. Different coating application methods: Zein-based edible coating containing *Heracleum persicum* essential oil for shelf-life enhancement of whey-less cheese. *Food Science & Nutrition*. 2024; 12(8): 5990–6010. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4269>
42. Soleimani S., Golestan L., Moghanjoughi A.M., Anvar S.A.A. Shelf-life enhancement of silver carp filets using psyllium gum/sodium-alginate coatings incorporated with *Heracleum persicum* essential oil and CuO nanoparticles. *Food Science and Technology International*. 2025. <https://doi.org/10.1177/10820132241311946>
43. Walker N.F., Hulme P.E., Hoelzel A.R. Population genetics of an invasive species, *Heracleum mantegazzianum*: implications for the role of life history, demographics and independent introductions. *Molecular Ecology*. 2003; 12(7): 1747–1756. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.2003.01866.x>
44. Pergl J., Perglová I., Pyšek P., Dietz H. Population age structure and reproductive behavior of the monocarpic perennial *Heracleum mantegazzianum* (Apiaceae) in its native and invaded distribution ranges. *American Journal of Botany*. 2006; 93(7): 1018–1028. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.7.1018>
45. Feige G.B., Ale-Agha N. Mycodiversity on a dead stem of the giant hogweed — *Heracleum mantegazzianum* Sommer et Levier. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. 2004; 69(4): 479–487.
46. Malfanova N. et al. Characterization of *Bacillus subtilis* HC8, a novel plant-beneficial endophytic strain from giant hogweed. *Microbial Biotechnology*. 2011; 4(4): 523–532. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2011.00253.x>
47. Rijal D.P., Alm T., Nilsen L., Alsos I.G. Giant invasive *Heracleum persicum*: Friend or foe of plant diversity?. *Ecology and Evolution*. 2017; 7(13): 4936–4950. <https://doi.org/10.1002/ece3.3055>
48. Веселкин Д.В., Иванова Л.А., Иванов Л.А., Микрюкова М.А., Болшаков В.Н., Бетехтина А.А. Способность к быстрому использованию ресурсов как основа инвазивного синдрома *Heracleum Sosnowskyi*. Доклады Академии наук. 2017; 473(1): 114–117. <https://doi.org/10.7868/S0869565217070283>
49. Shackleton R.T. et al. Integrated Methods for Monitoring the Invasive Potential and Management of *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed) in Switzerland. *Environmental Management*. 2020; 65(6): 829–842. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01282-9>
50. Renčo M., Jurová J., Gömöryová E., Čerevková A. Long-Term Giant Hogweed Invasion Contributes to the Structural Changes of Soil Nematofauna. *Plants*. 2021; 10(10): 2103. <https://doi.org/10.3390/plants10102103>
51. Javandel F., Nosrati M., van den Hoven R., Seidavi A., Laudadio V., Tufarelli V. Effects of Hogweed (*Heracleum persicum*) Powder, Flavophospholipol, and Probiotics as Feed Supplements on the Performance, Carcass and Blood Characteristics, Intestinal Microflora, and Immune Response in Broilers. *The Journal of Poultry Science*. 2019; 56(4): 262–269. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0180081>
52. Sedzik D., Chabudziński Z., Kostecka-Madalska O. *Heracleum sosnowskyi* Manden jako źródło n-octanolu. *Acta Poloniae Pharmaceutica*. 1966; 23(2): 149–152.
36. O'Brien T.P., McCully M.E. Cytoplasmic fibres associated with streaming and saltatory-particle movement in *Heracleum mantegazzianum*. *Planta*. 1970; 94(1): 91–94. <https://doi.org/10.1007/BF00386612>
37. McCutcheon A.R., Ellis S.M., Hancock R.E.W., Towers G.H.N. Antifungal screening of medicinal plants of British Columbian native peoples. *Journal of Ethnopharmacology*. 1994; 44(3): 157–169. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(94\)01183-4](https://doi.org/10.1016/0378-8741(94)01183-4)
38. Segneanu A.-E. et al. Insight into Romanian Wild-Grown *Heracleum sphondylium*: Development of a New PhytocARRIER Based on Silver Nanoparticles with Antioxidant, Antimicrobial and Cytotoxicity Potential. *Antibiotics*. 2024; 13(9): 911. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13090911>
39. Barzegar H., Alizadeh Behbahani B., Mehrnia M.A. Quality retention and shelf life extension of fresh beef using *Lepidium sativum* seed mucilage-based edible coating containing *Heracleum lasiopetalum* essential oil: an experimental and modeling study. *Food Science and Biotechnology*. 2020; 29(5): 717–728. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00715-4>
40. Mohebi E., Abbasvali M., Shahbazi Y. Development of biomaterials based on chitosan-gelatin nanofibers encapsulated with *Ziziphora clinopodioides* essential oil and *Heracleum persicum* extract for extending the shelf-life of vacuum-cooked beef sausages. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 253(6): 127258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127258>
41. Rajaei Lak H., Bazargani-Gilani B., Karami M. Different coating application methods: Zein-based edible coating containing *Heracleum persicum* essential oil for shelf-life enhancement of whey-less cheese. *Food Science & Nutrition*. 2024; 12(8): 5990–6010. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4269>
42. Soleimani S., Golestan L., Moghanjoughi A.M., Anvar S.A.A. Shelf-life enhancement of silver carp filets using psyllium gum/sodium-alginate coatings incorporated with *Heracleum persicum* essential oil and CuO nanoparticles. *Food Science and Technology International*. 2025. <https://doi.org/10.1177/10820132241311946>
43. Walker N.F., Hulme P.E., Hoelzel A.R. Population genetics of an invasive species, *Heracleum mantegazzianum*: implications for the role of life history, demographics and independent introductions. *Molecular Ecology*. 2003; 12(7): 1747–1756. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.2003.01866.x>
44. Pergl J., Perglová I., Pyšek P., Dietz H. Population age structure and reproductive behavior of the monocarpic perennial *Heracleum mantegazzianum* (Apiaceae) in its native and invaded distribution ranges. *American Journal of Botany*. 2006; 93(7): 1018–1028. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.7.1018>
45. Feige G.B., Ale-Agha N. Mycodiversity on a dead stem of the giant hogweed — *Heracleum mantegazzianum* Sommer et Levier. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. 2004; 69(4): 479–487.
46. Malfanova N. et al. Characterization of *Bacillus subtilis* HC8, a novel plant-beneficial endophytic strain from giant hogweed. *Microbial Biotechnology*. 2011; 4(4): 523–532. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2011.00253.x>
47. Rijal D.P., Alm T., Nilsen L., Alsos I.G. Giant invasive *Heracleum persicum*: Friend or foe of plant diversity?. *Ecology and Evolution*. 2017; 7(13): 4936–4950. <https://doi.org/10.1002/ece3.3055>
48. Veselkin D.V., Ivanova L.A., Ivanov L.A., Mikryukova M.A., Bolshakov V.N., Betekhtina A.A. Rapid use of resources as a basis of the *Heracleum sosnowskyi* invasive syndrome. *Doklady Biological Sciences*. 2017; 473(1): 53–56. <https://doi.org/10.1134/S0012496617020041>
49. Shackleton R.T. et al. Integrated Methods for Monitoring the Invasive Potential and Management of *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed) in Switzerland. *Environmental Management*. 2020; 65(6): 829–842. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01282-9>
50. Renčo M., Jurová J., Gömöryová E., Čerevková A. Long-Term Giant Hogweed Invasion Contributes to the Structural Changes of Soil Nematofauna. *Plants*. 2021; 10(10): 2103. <https://doi.org/10.3390/plants10102103>
51. Javandel F., Nosrati M., van den Hoven R., Seidavi A., Laudadio V., Tufarelli V. Effects of Hogweed (*Heracleum persicum*) Powder, Flavophospholipol, and Probiotics as Feed Supplements on the Performance, Carcass and Blood Characteristics, Intestinal Microflora, and Immune Response in Broilers. *The Journal of Poultry Science*. 2019; 56(4): 262–269. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0180081>
52. Sedzik D., Chabudziński Z., Kostecka-Madalska O. Essential oil from *Heracleum sosnowskyi* Manden as a source of n-octanol. *Acta Poloniae Pharmaceutica*. 1966; 23(2): 149–152 (in Polish).

53. Koldasbayeva D., Tregubova P., Shadrin D., Gasanov M., Pukalchik M. Large-scale forecasting of *Heracleum sosnowskyi* habitat suitability under the climate change on publicly available data. *Scientific Reports*. 2022; 12: 6128. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09953-9>
54. Žalnierius T., Šveikauskas V., Aphalo P.J., Gavelienė V., Būda V., Jurkonienė S. Gibberellic Acid (GA3) Applied to Flowering *Heracleum sosnowskyi* Decreases Seed Viability Even If Seed Development Is Not Inhibited. *Plants*. 2022; 11(3): 314. <https://doi.org/10.3390/plants11030314>
55. Кондратьев М.Н., Бударин С.Н., Ларикина Ю.С. Физиолого-экологические механизмы инвазивного проникновения борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) в неиспользуемые агроэкосистемы. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2015; (2): 36–49. EDN UARXXL
56. Чеботарь В.К., Заплаткин А.Н., Щербakov А.В., Мальфанова Н.В., Старцева А.А., Костин Я.В. Микробные препараты на основе эндофитных и ризобактерий, которые перспективны для повышения продуктивности и эффективности использования минеральных удобрений у ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и овощных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 2016; 51(3): 335–342. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.3.335rus>
57. Доржиев С.С., Патева И.Б. Энергоресурсосберегающая технология получения биоэтанола из зеленой массы растений рода *Heracleum*. *Ползуновский вестник*. 2011; (2–2): 251–255. EDN PBPJCR
58. Любов В.К., Булыгин Ю.В., Алексеев П.Д. Энергетическое использование инвазивных растений на примере биомассы борщевика Сосновского. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2025; 18(2): 169–175. EDN VBDDDY
59. Полина И.Н., Миронов М.В., Белый В.А. Термогравиметрическое и кинетическое исследование топливных гранул из биомассы *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2021; 64(4): 15–20. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6338>
60. Мусихин П.В., Сигаев А.И. Исследование физических свойств и химического состава борщевика Сосновского и получение из него волокнистого полуфабриката. *Современные наукоемкие технологии*. 2006; (3): 65–67. EDN JSACTV
61. Ершова А.С., Савиновских А.В., Артемов А.В., Шестаков Д.И., Вураско А.В. Использование побеговой части борщевика Сосновского для получения древесных пластиков без связующего. *Вестник технологического университета*. 2020; 23(12): 52–55. EDN LZCEGM
62. Коряковцева Т.А., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С. Использование растительных и угольных отходов в качестве вторичного сырья в бетонных композитах. *Строительство и техногенная безопасность*. 2022; 27: 27–37. EDN VNLFS
63. Гордина Е.Н., Злобин А.А., Мартинсон Е.А., Литвинцев С.Г. Пектиновые полисахариды каллусной ткани стебля борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden). *Теоретическая и прикладная экология*. 2019; (1): 41–46. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-041-046>
64. Лунева Н.Н. Борщевик Сосновского *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae): уничтожение или рациональное использование растительного сырья? *Растительные ресурсы*. 2024; 60(1): 54–68. <https://doi.org/10.31857/S0033994624010031>
65. Ашихмина Т.Я., Товстик Е.В., Адамович Т.А. Оценка химического состава *Heracleum sosnowskyi* Manden как альтернативного источника сырья для различных отраслей промышленности (обзор). *Химия растительного сырья*. 2024; (4): 32–45. <https://doi.org/10.14258/jcpr.20240414599>
66. Borska E. et al. Bioactive lipids and allelopathic potential of the invasive plant *Heracleum Sosnowskyi*: insights into its fatty acid composition, antimicrobial and cytotoxic effects. *Frontiers in Pharmacology*. 2025; 16: 1582694. <https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1582694>
67. Сушук А.А., Калинин Д.С., Матвеева Е.М. Как влияет инвазия борщевика Сосновского *Heracleum sosnowskyi* (Umbelliferae) на сообщества почвенных нематод луговых экосистем? *Российский журнал биологических инвазий*. 2025; 18(3): 171–187. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-18-3-171-187>
68. Товстик Е.В., Широких А.А., Широких И.Г. Микробиологическое состояние почв под инвазивными зарослями борщевика Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi*). *Вестник современных исследований*. 2018; (2–2): 5–8. EDN YUMNQA
53. Koldasbayeva D., Tregubova P., Shadrin D., Gasanov M., Pukalchik M. Large-scale forecasting of *Heracleum sosnowskyi* habitat suitability under the climate change on publicly available data. *Scientific Reports*. 2022; 12: 6128. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09953-9>
54. Žalnierius T., Šveikauskas V., Aphalo P.J., Gavelienė V., Būda V., Jurkonienė S. Gibberellic Acid (GA3) Applied to Flowering *Heracleum sosnowskyi* Decreases Seed Viability Even If Seed Development Is Not Inhibited. *Plants*. 2022; 11(3): 314. <https://doi.org/10.3390/plants11030314>
55. Kondratiev M.N., Budarin S.N., Larikova Yu.S. Physiological and ecological mechanisms of invasive penetration of *sosnowskyi* hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden) in unexploitable agroecosystems. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2015; (2): 36–49 (in Russian). EDN UARXXL
56. Chebotar V.K., Zaplatkin A.N., Shcherbakov A.V., Malfanova N.V., Startseva A.A., Kostin Ya.V. Microbial preparations on the basis of endophytic and rhizobacteria to increase the productivity in vegetable crops and spring barley (*Hordeum vulgare* L.), and the mineral fertilizer use efficiency. *Agricultural Biology*. 2016; 51(3): 335–342. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.3.335eng>
57. Dorzhiyev S.S., Pateyeva I.B. Energy and resource-saving technology for producing bioethanol from the green mass of plants of the genus *Heracleum*. *Polzunovskiy vestnik*. 2011; (2–2): 251–255 (in Russian). EDN PBPJCR
58. Lyubov V.K., Bulygin Yu.V., Alekseev P.D. Energy Use of Invasive Plants on the Example of Sosnowsky's Hogweed Biomass. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2025; 18(2): 169–175 (in Russian). EDN VBDDDY
59. Polina I.N., Mironov M.V., Belyy V.A. Thermogravimetric and kinetic study of fuel pellets from biomass of *Heracleum sosnowskyi* Manden. *ChemChemTech*. 2021; 64(4): 15–20 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6338>
60. Musikhin P.V., Sigayev A.I. Study of the physical properties and chemical composition of Sosnowsky's hogweed and production of fibrous semi-finished product from it. *Modern high technologies*. 2006; (3): 65–67 (in Russian). EDN JSACTV
61. Ershova A.S., Savinovskikh A.V., Artyomov A.V., Shestakov D.I., Vurasko A.V. Sosnowsky's hogweed shoot part: use for binder-free wood plastic production. *Herald of Technological University*. 2020; 23(12): 52–55 (in Russian). EDN LZCEGM
62. Koryakovtseva T.A., Zaborova D.D., Gamayunova O.S. Use of plant and coal waste as a secondary raw materials in concrete composites. *Construction and industrial safety*. 2022; 27: 27–37 (in Russian). EDN VNLFS
63. Gordina E.N., Zlobin A.A., Martinson E.A., Litvinets S.G. Pectic polysaccharides of callus tissue of the stem of *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Theoretical and applied ecology*. 2019; (1): 41–46 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-041-046>
64. Luneva N.N. *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae): eradication or wise utilization of plant raw Materials?. *Vegetation Resources*. 2024; 60(1): 54–68 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0033994624010031>
65. Ashikhmina T.Ya., Tovstik E.V., Adamovich T.A. Assessment of the Chemical Composition of *Heracleum sosnowskyi* Manden as an Alternative Source of Raw Materials for Various Industries (A Review). *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2025; 51(7): 2904–2913. <https://doi.org/10.1134/S1068162025150014>
66. Borska E. et al. Bioactive lipids and allelopathic potential of the invasive plant *Heracleum Sosnowskyi*: insights into its fatty acid composition, antimicrobial and cytotoxic effects. *Frontiers in Pharmacology*. 2025; 16: 1582694. <https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1582694>
67. Sushchuk A.A., Kalinkina D.S., Matveeva E.M. How does the invasion of *Heracleum sosnowskyi* (Umbelliferae) affect soil nematode communities in meadow ecosystems?. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2025; 18(3): 171–187 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1996-1499-18-3-171-187>
68. Tovstik E.V., Shirokikh A.A., Shirokikh I.G. Microbiological state of soils under invasive thickets of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum Sosnowskyi*). *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018; (2–2): 5–8 (in Russian). EDN YUMNQA

69. Лаптева Е.М., Захожий И.Г., Дальке И.В., Смотрина Ю.А., Генрих Э.А. Влияние инвазии борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) на плодородие постагрогенных почв Европейского Северо-Востока. *Теоретическая и прикладная экология*. 2021; (3): 66–73.
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-066-073>

70. Товстик Е.В., Широких И.Г., Соловьёва Е.С., Широких А.А., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Изменение почвенной актинобиоты под влиянием инвазии борщевика Сосновского. *Теоретическая и прикладная экология*. 2018; (4): 114–118.
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-114-118>

71. Товстик Е.В., Широких А.А., Широких И.Г. Микробные сообщества прикорневой зоны борщевика Сосновского. *Вестник современных исследований*. 2018; (10–7): 181–186.
 EDN YOKBDN

72. Товстик Е.В., Широких И.Г., Сазанов А.В. Биотехнологический потенциал актинобактерий, выделенных из почв под *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Актуальная биотехнология*. 2019; (3): 153–155.
 EDN KMKUPW

ОБ АВТОРАХ

Ирина Игоревна Рассохина
 научный сотрудник
rasskhinairina@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6129-6912>

Светлана Викторовна Ерегина
 кандидат географических наук,
 старший научный сотрудник
ereginasv@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8136-4663>

Любовь Владимировна Сухарева
 научный сотрудник
lyubov.suxareva@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1069-0856>

Андрей Викторович Платонов
 кандидат биологических наук, доцент,
 ведущий научный сотрудник
platonov70@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1110-7116>

Вологодский научный центр Российской академии наук,
 ул. Горького, 56А, Вологда, 160014, Россия

69. Lapteva E.M., Zakhozhy I.G., Dalke I.V., Smotrina Yu.A., Genrikh E.A. Influence of *Heracleum sosnowskyi* Manden. Invasion on Postagrogenic Soil Fertility in European North-East. *Theoretical and applied ecology*. 2021; (3): 66–73 (in Russian).
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-066-073>

70. Tovstik E.V., Shirokikh I.G., Solovyova E.S., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The change in soil actinobiote under the influence of *Heracleum sosnowskyi* invasion. *Theoretical and applied ecology*. 2018; (4): 114–118 (in Russian).
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-114-118>

71. Tovstik E.V., Shirokikh A.A., Shirokikh I.G. Microbial communities in the root zone of Sosnowsky's hogweed. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018; (10–7): 181–186 (in Russian).
 EDN YOKBDN

72. Tovstik E.V., Shirokikh I.G., Sazanov A.V. Biotechnological potential of actinobacteria isolated from soils under *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Topical biotechnology*. 2019; (3): 153–155 (in Russian).
 EDN KMKUPW

ABOUT THE AUTHORS

Irina Igorevna Rassokhina
 Researcher
rasskhinairina@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6129-6912>

Svetlana Viktorovna Eregina
 Candidate of Geographical Sciences,
 Senior Researcher
ereginasv@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8136-4663>

Lyubov Vladimirovna Sukhareva
 Researcher
lyubov.suxareva@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1069-0856>

Andrey Viktorovich Platonov
 Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
 Leading Researcher
platonov70@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1110-7116>

Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences,
 56A Gorky St., Vologda, 160014, Russia

Agrocon Alumni
 Деловой форум выпускников
 аграрных направлений

agrocon
 27 ФЕВ | РУДН

Реклама

УДК 641/642.541.1:574.2:613.2

Научный обзор



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-110-126

А.А. Лукин^{1,2}

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

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

✉ lukin3415@gmail.com

Поступила в редакцию: 28.09.2025

Одобрена после рецензирования: 13.11.2025

Принята к публикации: 28.11.2025

© Лукин А.А.

Методы идентификации микропластиков в пищевых системах

РЕЗЮМЕ

В 1970-х годах ученые начали сообщать о наличии пластиковых предметов в миллиметрах и позже в диапазоне микрометров в окружающей среде и питьевой воде. В 2004 году мелкие частицы пластмассы, обнаруженные в окружающей среде, были впервые названы микропластиком, а в 2008-м в ходе международного научно-исследовательского семинара — пластиковыми частицами размером менее 5 мм.

Тем не менее вопросы, касающиеся допустимых размеров, видов полимеров, конфигурации и возникновения микропластика, до сих пор остаются предметом дискуссий в научном сообществе.

Верхний предел размера часто устанавливается до 5 мм. По своему происхождению микропластики делятся на первичные и вторичные. Методы, используемые для анализа микропластика в различных системах, разнообразны. Довольно простым является обнаружение невооруженным глазом или с помощью светового микроскопа. Идентификация микропластика иногда подтверждается окрашиванием или обычной флотацией (так как плотность пластика меньше плотности воды). Однако для идентификации микропластика требуются более сложные методы — термоаналитические или спектроскопические методы. Научный обзор посвящен методам идентификации микропластиков в пищевых системах. Рассматриваются различные подходы к выявлению и анализу микропластиков, включая визуальную идентификацию, оптическую и электронную микроскопию, флуоресцентную микроскопию, инфракрасную и рамановскую спектроскопию, а также термоаналитические методы. Особое внимание уделено преимуществам и недостаткам каждого метода, а также их применению в реальных условиях. В заключение делается вывод о перспективности рамановской микроскопии и инфракрасной спектроскопии для идентификации микропластиков в пищевых системах и сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: микропластик, визуальная идентификация, оптическая микроскопия, флуоресцентная микроскопия, инфракрасная спектроскопия, термогравиметрический анализ

Для цитирования: Лукин А.А. Методы идентификации микропластиков в пищевых системах. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 110–126.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-110-126>

Review



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-110-126

Aleksander A. Lukin^{1,2}

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

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

✉ lukin3415@gmail.com

Received by the editorial office: 28.09.2025

Accepted in revised: 13.11.2025

Accepted for publication: 28.11.2025

© Lukin A.A.

Methods for identifying microplastics in food systems

ABSTRACT

In the 1970s, scientists began reporting the presence of plastic objects in millimeters and later in the micrometer range in the environment and drinking water. In 2004, small plastic particles found in the environment were first named microplastics, and in 2008, during an international research seminar, they were named plastic particles less than 5 mm in size.

However, questions regarding acceptable sizes, polymer types, configuration, and origin of microplastics remain a subject of debate in the scientific community.

The upper size limit is often set at 5 mm. Microplastics are classified by origin as primary or secondary. The methods used to analyze microplastics in various systems vary. Relatively simple methods include detection with the naked eye or using a light microscope. Microplastic identification is sometimes confirmed by staining or simple flotation (since plastic is less dense than water). However, identifying microplastics requires more sophisticated methods — thermal analytical or spectroscopic techniques. This scientific review focuses on methods for identifying microplastics in food systems. Various approaches to detecting and analyzing microplastics are considered, including visual identification, optical and electron microscopy, fluorescence microscopy, infrared and Raman spectroscopy, and thermal analytical methods. Particular attention is given to the advantages and disadvantages of each method, as well as their application in real-world conditions. The paper concludes by highlighting the potential of Raman microscopy and infrared spectroscopy for identifying microplastics in food systems and agricultural products.

Key words: microplastics, visual identification, optical microscopy, fluorescence microscopy, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis

For citation: Lukin A.A. Methods for identifying microplastics in food systems. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 110–126 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-110-126>

Введение/Introduction

Микропластик — это достаточно новый вид загрязнителей пищевого сырья и сельскохозяйственной продукции, он потенциально может повлиять на социально-экологическую среду. Соответственно, отрицание негативного воздействия на окружающую среду требует тщательного изучения физических и химических характеристик микропластика, источников и путей выбросов, воздействия на экологическую среду, загрязненных пищевых цепочек, особенно пищевой сети человека, а также воздействия на здоровье человека [1–5].

Микропластик — очень мелкие пластиковые частицы размером менее 5 мм, которые имеют разный цвет в зависимости от источника выбросов. Основными проблемами анализа микропластика являются его многочисленные физические и химические свойства, состав и концентрация частиц. Для исследования источника микропластика нет общепринятой классификация. Микропластики делятся на первичные и вторичные. Первичные микропластики производятся для бытового и промышленного применения в микроскопических размерах, тогда как вторичные образуются в результате разрушения структуры макропластика под воздействием факторов окружающей среды, таких как ветер, температура, ультрафиолетовое излучение [6–10].

Человек подвергается воздействию микропластика в первую очередь через потребление воды и продуктов питания. Частицы микропластика оказывают воздействие на здоровье, а некоторые виды считаются эндокринными разрушителями или канцерогенами. Кроме того, когда микропластики попадают в окружающую среду, они могут входить в пищевую цепь животных и в конечном итоге снова проникают в организм человека [11–14].

Учитывая повсеместное распространение, микропластик активно загрязняет продукты питания и сельскохозяйственную продукцию. Источники, характеристики и типы микропластиков и их воздействие должны быть оценены. Недавние исследования продемонстрировали наличие микро- и нанопластиков в крови человека, демонстрируя их системное воздействие на человека. Способность микро- и нанопластиков откладываться в органах весьма вероятна. Однако токсичность и побочные эффекты, вызванные микропластиком или связанными с ними загрязняющими веществами, должны быть идентифицированы с точными механизмами, и должны быть установлены пределы [15–20].

Цели исследования данного обзора — систематизация и критический анализ существующих методов идентификации микропластиков в пищевых системах и сельскохозяйственной продукции.

Основная задача заключается в оценке преимуществ и недостатков различных методик, таких как визуальная идентификация, оптическая и электронная микроскопия, флуоресцентная

микроскопия, инфракрасная и рамановская спектроскопия, а также термоаналитические методы.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

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

Обзор составлен в основном на публикациях зарубежных авторов. Анализ научных публикаций охватывает период с 1994 по 2025 год.

Поиск потенциально релевантных статей производили по ключевым словам в трех электронных базах данных (Scopus, Sci-Hub, eLIBRARY.RU) и поисковой системы «Академия Google».

При выборе статей для обзора приоритет отдавали источникам с большим количеством цитирования. Поиск литературы осуществляли с использованием ключевых слов, относящихся к теме исследования («микропластик», «пищевые системы», «методы идентификации»), введенных преимущественно на английском и русском языках. Предпочтение отдавали статьям с высоким числом цитирований, что свидетельствует о значимости и признании работ научным сообществом.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Новые методы экстракции микропластика редко обсуждаются в литературе, за исключением использования ультразвука для облегчения процесса экстракции. Использование ультразвуковых методов может помочь свести к минимуму образование загрязняющих веществ во время процессов разделения, экстракции и пищеварения. F. Collard и др. (2015) [21] сообщили об использовании ультразвуковой обработки с частотой 50 Гц в течение 5 минут для удаления мелких частиц, оставшихся на мембранном фильтре из ацетата целлюлозы (пористость 5 мкм).

Импульсную ультразвуковую экстракцию успешно использовали для удаления проглоченных частиц из желудка мелких рыб [22] без использования каких-либо химикатов. Использование более коротких импульсов ультразвуковой энергии сводит к минимуму потенциальное физическое повреждение микропластика. Жидкостную экстракцию под давлением (PFE) с использованием метанола при 100 °C для предварительной экстракции с последующим применением дихлорметана при 180 °C для извлечения микропластика (например, HDPE, PP, PVC, PS и PET) из твердых отходов [22]. Метод PFE, вероятно, будет полезен, особенно с морскими отложениями или морской водой, богатой планктоном, после первоначальной фильтрации, поскольку он может эффективно извлекать пластиковые частицы (< 30 мкм), которые не поддаются выделению путем флотации или других процедур физического разделения (рис. 1).

Рис. 1. Метод флотации для извлечения микропластиков в образцах пищевых систем [22]

Fig. 1. Flotation method for the recovery of microplastics in food system samples [22]



L. Wang и др. (2019) продемонстрировали использование фотокаталитических (TiO_2) микромоторов для удаления микропластика из проб воды окружающей среды [23]. Эти микромоторы могли притягивать и удалять пассивные частицы микропластика из воды. Микропластики притягиваются микромоторами, вызывающими образование агрегатов микропластика в ходе фотохимических реакций, и их можно собирать из воды. После того как микропластики извлечены из окружающей матрицы окружающей среды, их необходимо охарактеризовать.

В последние годы в связи с ростом научного и общественного интереса к теме предлагаются всё больше методов их качественного, количественного или комбинированного анализа [24]. Разработка методов анализа микропластика требует междисциплинарного подхода, основанного на опыте смежных областей, таких как аналитическая химия и материаловедение. Как правило, анализ состоит из двух этапов — физической характеристики частиц (например, с помощью оптического микроскопа) с последующей химической характеристикой (например, с помощью хроматографии) для идентификации типов пластика и идентификации самого микропластика.

Подготовка проб для анализа микропластиков

Пробоподготовка является ключевым элементом обнаружения микропластиков. Микропластики нельзя извлечь из образца применением химических растворителей — как полярных, так и неполярных. При подготовке проб основное внимание уделяется разрушению и (или) удалению материала матрицы пробы и выделению частиц, а не экстракции целевого вещества.

В литературе можно найти различные методы извлечения — от ферментативного расщепления (мягких тканей) до более сильных процессов окисления с использованием перекиси водорода и использования концентрированных кислот и оснований для разрушения более твердых матриц. Кроме того, можно встретить и различные комбинации этих методов. Ни один метод не является универсальным, не говоря уже о том, что существуют стандартизированные методы [25].

Использование кислотного расщепления (рис. 2) хорошо известно в аналитической химии для анализа микроэлементов, а также для выделения микропластиков [26]. Хотя ряд типов полимеров устойчивы к таким агрессивным условиям, есть сообщения, показывающие, что кислотные (и в меньшей степени щелочные) методы могут

Рис. 2. Химические методы обработки, используемые для переваривания микропластиков в пищевых системах [25]

Fig. 2. Chemical treatment methods used to digest microplastics in food systems [25]

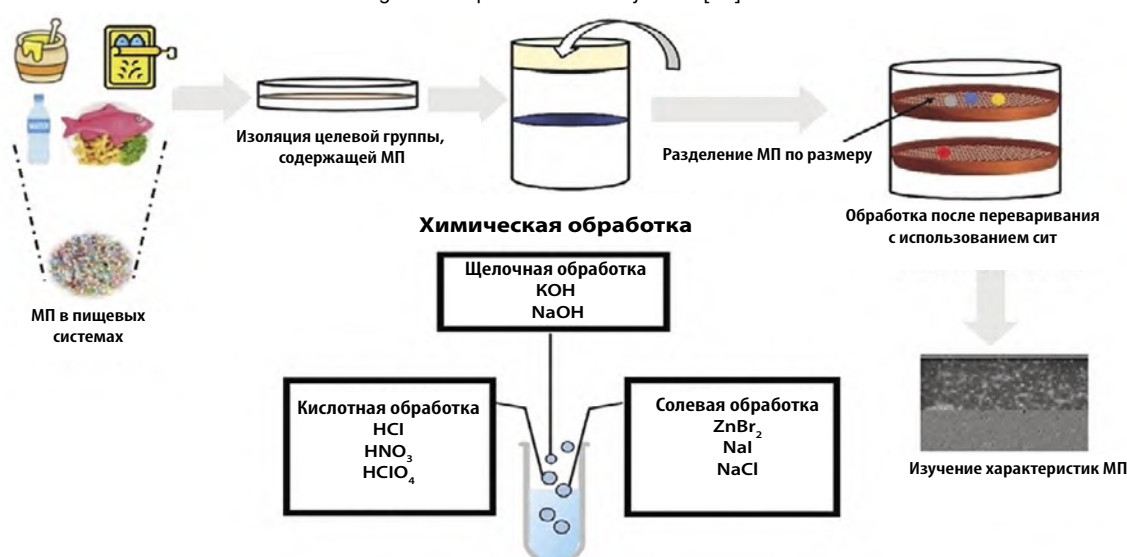
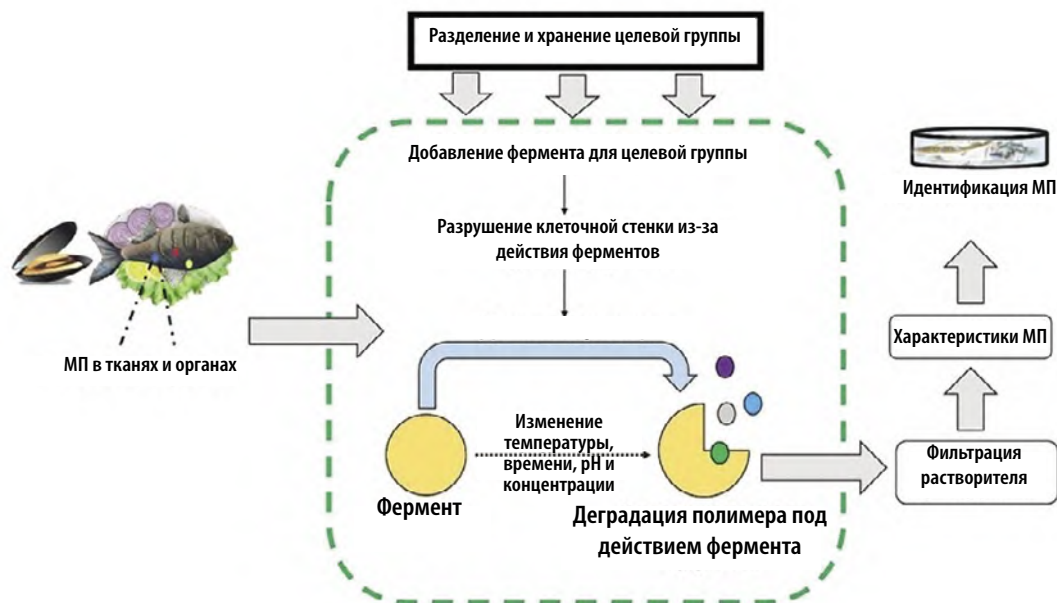


Рис. 3. Ферментативная обработка для выделения микропластиков из образцов пищевых систем [86]**Fig. 3.** Enzymatic treatment for the isolation of microplastics from food system samples [86]

привести к повреждению или полной деградации.

M.G.J. Löder и др. [27] опубликовали протокол ферментативной очистки (рис. 3), включающий семь последовательных этапов с использованием детергентов, окислителей, а также разделение по плотности. Протокол был успешно применен к образцам окружающей среды с низкими концентрациями микропластиков.

Был рассмотрен опыт работы с различными матрицами образцов окружающей среды, чтобы создать улучшенную и универсально применимую версию базового протокола ферментативной очистки, которая совместима с анализом воды на основе микроинфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (μ FTIR) на основе матричного детектора в фокальной плоскости (FPA). Ферментативное расщепление, являющееся более мягкой химической обработкой, считается многообещающим этапом предварительной обработки для анализа.

Гидроксид калия в концентрации 10% оказывается наиболее распространенным раствором для пищеварения при деградации мягких тканей, поскольку он цитируется в 50% статей, сообщающих об анализе обнаружения микропластиков у мидий, устриц и моллюсков [28]. В меньшей степени используют 30%-ную перекись водорода и 9%-ную азотную кислоту.

На мягких тканях были протестированы ряд ферментов, включая протеазу К, трипсин, липазу и их смеси. Гидроксид калия и перекись водорода широко используются для переваривания рыбы. Пероксид водорода [29], азотную кислоту [30] и хлористый водород [31] иногда применяют при анализе питьевой воды для облегчения этапа фильтрации. Фильтрацию и осаждение часто используют в качестве заключительного этапа выделения микропластиков из матрицы.

Визуальная идентификация

Визуальная идентификация — самый простой и самый дешевый вид анализа для определения количественного содержания микропластика [9]. Микропластики размером от 1 до 5 мм достаточно большие, чтобы их можно было различить невооруженным глазом (к примеру, пластиковые гранулы легко идентифицировать визуально в зависимости от прозрачности, формы и цвета частиц). Например, N.W. Нео и др. (2013) количественно оценили обилие мелкого пластикового мусора на пляже Хыннам, идентификацию и сортировку которого выполняли исключительно невооруженным глазом [32].

Хотя результат визуальной сортировки широко используется, он не совсем надежен, поскольку точность и эффективность подхода сильно зависят от наблюдателя. В случае морских проб, которые обычно содержат высокий уровень мешающих неорганических и органических материалов, вероятность неправильной классификации может быть высокой. Даже более опытным исследователям трудно различить окрашенный пластиковый материал, близкий к цветам природных частиц, или другие материалы, такие как частицы кварца, кусочки стекла, мелкие фрагменты растений, и велика вероятность недооценки или завышения количества.

Оптическая микроскопия

Идентификация под световым микроскопом используется для более мелкого микропластика (обычно < 1 мм). Оценку количества, цвета, размера и формы микропластиков обычно проводят на основе оптической микроскопии. Препаровальные микроскопы предпочтительнее составных микроскопов, поскольку большее расстояние между образцом и объективом позволяет использовать такие инструменты, как пинцеты,

полезные для сбора подозрительных пластиковых частиц для дальнейшего анализа, или зонды, используемые для проверки их физических свойств.

Исследования, сообщающие об анализе микропластиков в пищевых продуктах с помощью оптической микроскопии, по сути, часто ссылаются на набор рекомендаций по визуальной идентификации микропластиков [33, 34], включая тест, заключающийся в протыкании подозреваемого микропластика горячей иглой для наблюдения за его реакцией на высокие температуры [35, 36]. Тем не менее точность исследований часто снижается из-за отсутствия надлежащего химического распознавания и, следовательно, наличия природных органических и неорганических частиц, которые могут быть ошибочно классифицированы как микропластик.

Были изучены несколько методов селективного окрашивания, чтобы частично обойти химическую «слепоту» этого метода и улучшить обнаружение синтетических полимеров [37, 38]. Нильский красный — наиболее распространенный краситель при анализе микропластиков. Анализ на основе оптической микроскопии проводили на различных образцах продуктов питания и напитков, включая морепродукты, столовую соль, мед и сахар, водопроводную воду и пиво.

Наивысшее латеральное разрешение, которого можно достичь с помощью оптических инструментов, согласно теории Аббе, определяется как $D = \lambda/2NA$. Как правило, разрешение оптических приборов может быть приблизительно равно половине длины волны света, используемого для облучения образца. Несмотря на теоретический предел разрешения 200 нм и практический рабочий предел порядка 1 мкм, исследования, в которых используется оптическая микроскопия для анализа микропластиков в пищевых продуктах, не сообщают об обнаружении подозрительных пластиковых частиц размером менее 20 мкм [39, 40], за одним исключением M. Renzi *и др.* [41], которые сообщают о частицах размером до 4 мкм.

Частота ошибок пластикоподобных частиц при микроскопическом наблюдении обычно превышает 20%, а для прозрачных объектов может достигать 70%, что было подтверждено следующим спектроскопическим анализом [42]. Скорость ошибочной классификации часто увеличивалась с уменьшением размера частиц, и сложно идентифицировать синтетические и натуральные волокна только с помощью микроскопии.

Флуоресцентная микроскопия

Флуоресцентные красители используют в оптической микроскопии для увеличения контраста между аналитом и фоном. Применительно к анализу микропластика сочетание флуоресцентных красителей и микроскопии позволяет определить количество, размер и форму частиц.

Нильский красный — флуоресцентный краситель, часто применяемый при анализе микропластиков [43, 44], является сольватохромным веществом, что приводит к красному смещению его спектра флуоресценции, связанному с увеличением полярности материала, окружающего молекулы нильского красного. Как следствие, разные типы микропластиков демонстрируют разные ответы при использовании определенного набора флуоресцентных фильтров. Эти эффекты выбросов, зависящие от типа микропластика, применяли в литературе для обнаружения и предварительной идентификации [45, 46].

Более того, была предложена связь между уровнем эмиссии и удельной плотностью окрашенной частицы. После этого окрашенный материал можно подвергнуть ИК-Фурье-анализу, поскольку краситель не препятствует правильной интерпретации ИК-спектров.

J.C. Prata *и др.* [43] продвинул процедуру окрашивания на шаг дальше, предложив программное обеспечение для объективного и быстрого автоматического подсчета микропластиков. Хотя этот метод имеет недостатки, связанные с отсутствием определения цвета и типа полимера, он преодолевает некоторые недостатки визуального подсчета за счет сокращения времени анализа и устранения предвзятости оператора.

В другой работе [47] были изучены основные факторы, влияющие на количественное определение микропластиков, окрашенных нильским красным, посредством обработки флуоресцентных изображений. Эти факторы включали саму процедуру окрашивания, а также условия и настройки цифровой камеры, что привело к дальнейшему совершенствованию автоматического количественного анализа. Комбинация нильского красного и флуоресцентной микроскопии была применена для анализа микропластика в бутилированной воде [48] и анализа микропластиков, выделяемых внутренним гидрофобным слоем одноразовых бумажных стаканчиков [11].

Хотя этот метод относительно прост и легок в применении, несколько факторов могут значительно увеличить вариабельность и, следовательно, повлиять на надежность получаемых данных. Очевидным фактором является то, что другие материалы, присутствующие в суспензиях микропластиков, полученных после расщепления сложных матриц, таких как образцы пищевых продуктов и напитков, могут быть окрашены нильским красным, что приводит к завышению количества частиц. Когда для удержания и концентрирования микропластиков используется мембранная фильтрация и с помощью микроскопического метода исследуется только часть фильтра, одной из наиболее важных переменных, которые следует учитывать, является наличие достаточного количества микропластика в интересующей области, чтобы обеспечить уровень достоверности полученных данных.

Время и усилия, необходимые для подсчета количества микропластика на более репрезентативной части поверхности мембранного фильтра, в большинстве лабораторий будут непомерно высокими. Другая технология (твердофазная цитометрия) (SPC) позволяет избежать этой проблемы, поскольку она способна за короткое время сканировать, обнаруживать и подсчитывать все флуоресцентно-меченные частицы на всей площади поверхности мембранного фильтра. Эта технология до сих пор используется для оценки численности и жизнеспособности бактерий в воде [49].

SPC сочетает в себе систему быстрого обнаружения с прямой микроскопической проверкой каждого флуоресцентного объекта, что позволяет пользователю определить, действительно ли зарегистрированный флуоресцентный объект представляет собой бактерию.

В настоящее время этот тип приборов высокоавтоматизирован, и для правильного обнаружения бактерий используют алгоритмы [50]. То же оборудование можно использовать для обнаружения микропластиков после флуоресцентного окрашивания нильским красным. Однако в литературе отсутствуют сообщения о применении SPC для анализа микропластиков в пищевых продуктах.

Электронная микроскопия

Электронная микроскопия (ЭМ) отличается от оптической тем, что в ней образец облучается пучком электронов высокой энергии с ангстремной длиной волны вместо видимого света (рис. 4). Поскольку длина волны намного ниже длины волны видимого света (200–400 нм), спектральное разрешение значительно выше, что делает его отличным методом получения подробной информации о двумерной морфологии и размере полимерных частиц (вплоть до нанометрового масштаба).

ЭМ-анализ микропластиков обычно выполняется с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), где прошедшие электроны создают двумерное проекционное изображение электронного облака частицы [51] и сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), где вторичные и обратно рассеянные электроны дают детальное изображение поверхности частицы. В отличие от ПЭМ, СЭМ не ограничена размерами образца, а также использует более широкое поле зрения, которое позволяет одновременно измерять несколько частиц. ЭМ-анализ позволяет определить количество и размер частиц, но не может предоставить информацию об их химическом составе, цвете и форме.

Как уже упоминалось, ПЭМ создает двухмерные проекционные карты, которые не содержат никакой информации о третьем измерении, в то время как СЭМ является в основном поверхностным методом. Даже если изучение рассеянных электронов может предоставить трехмерные карты, характеристики на оси z не являются количественными.

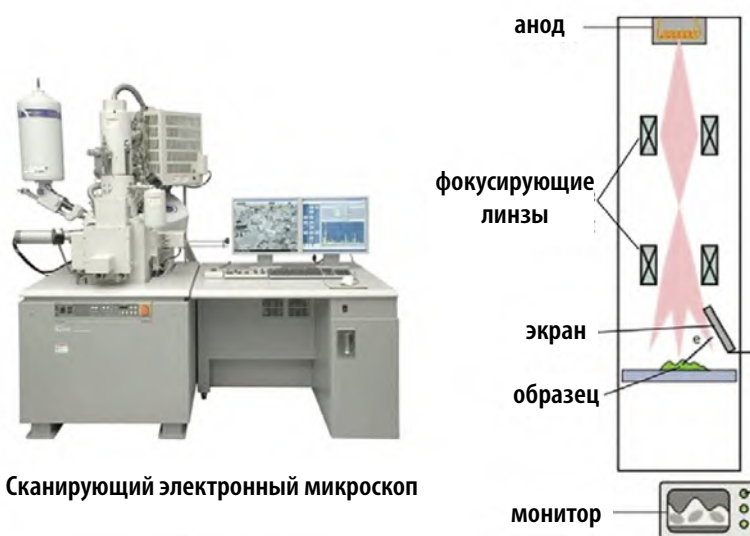
Для СЭМ-анализа микропластики в пищевых продуктах подозрительные пластиковые частицы, выделенные на фильтрах после расщепления матрицы и обнаруженные с помощью оптической микроскопии, переносят с помощью металлического пинцета на проводящую клейкую углеродную ленту [52] или заглушки [53]. Для проведения анализа пластмасс их необходимо покрыть пленкой напыленного золота или любым другим металлическим покрытием. Альтернативно срезы, вырезанные из фильтров из политетрафторэтилена, можно покрыть слоем золота и напрямую проанализировать с помощью СЭМ, избегая ограничивающего размера и трудоемкого переноса частиц. СЭМ в сочетании с FTIR использовали для анализа микропластика в морепродуктах, соли, водопроводной воде.

Поскольку ЭМ-анализ не дает полной количественной информации ни о трехмерной форме, ни о химическом составе частиц, с трудом может отличить природный органический материал от синтетического. Некоторое представление об элементном составе можно получить, оснатив ЭМ-приборы энергодисперсионным рентгеновским аппаратом.

Z. Wang и др. [54] определили наличие частиц ПВХ в кишках рыб на основе элементного обнаружения пиков хлора, полученных с помощью SEM-EDX, тогда как Pan и др. [55] использовали сигналы азота в качестве индикатора образования биопленок на поверхности частиц PP, PS и PE.

Рис. 4. Сканирующая электронная микроскопия идентификации микропластиков [58]

Fig. 4. Scanning electron microscopy identification of microplastics [58]



Сканирующий электронный микроскоп

A. Vianello и др. [56] использовали SEM для изображения частиц полиэтилена и полипропилена после идентификации с помощью μ FTIR. ЭМ может быть предпочтительным методом, особенно для обнаружения наночастиц микропластика, поскольку существует не так много альтернативных методов, позволяющих наблюдать эти маленькие пластиковые частицы.

S. Dehghani и др. (2017) применили SEM-EDX для обнаружения частиц микропластика с различной морфологией (например, сферические, гексагональные, волокна, неправильные многогранники), размеров и цветов [57]. Их результаты предполагают наличие добавок в полимерах пластика или адсорбированных частиц с Al, Na, Ca, Mg и Si на поверхности микропластиков. Хотя химический состав репрезентативных образцов можно получить с помощью СЭМ-ЭДС, оператор может использовать визуальные признаки для идентификации микропластика в образце, что снова приводит к ошибочным оценкам.

Сканирующая зондовая микроскопия

В то время как вышеупомянутые методы микроскопии генерируют изображения на основе взаимодействия между образцом и электромагнитным излучением или электронами, сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) исследует поверхность образца с помощью физического наконечника [58]. Растр зонда сканирует поверхность образца, и сигнал взаимодействия зонда с образцом регистрируется в каждом пикселе. Записанные значения сигнала преобразуются в трехмерную тепловую карту.

Было разработано несколько методов СЗМ, основанных на различных физических величинах, которые можно измерить во время сканирования. Среди них атомно-силовая микроскопия (АСМ) реагирует на силы взаимодействия, возникающие между зондом и образцом. Эти силы действуют на кантилевер, удерживающий зонд, вызывая изменение его движения, которое можно измерить количественно.

АСМ-анализ позволяет изучать количество, размер и форму частиц. АСМ предоставляет очень подробную трехмерную топологическую информацию об отдельных частицах без необходимости облучения образца, преодолевая ограничения разрешения, налагаемые дифракционным пределом света в оптической микроскопии, а также ограничения окружающей среды, необходимость металлического покрытия и 2D разрешенные карты электронной микроскопии. АСМ способна достигать субнанометрового разрешения (в зависимости от размера зонда) в жидкой, воздушной и вакуумной среде, что позволяет проводить трехмерную характеристику поверхности, полезную при изучении поведения микропластиков в отношении адсорбции загрязнений [59] и модификации

поверхности из-за выветривания [60] или химической предварительной обработки [61].

Еще одним преимуществом применения АСМ для топологических исследований поверхности пластиковых частиц является то, что по сравнению с ЭМ зондовое изображение предотвращает возникновение повреждений, возникающих из-за тепла, локально генерируемого электронным лучом при большом увеличении.

D. Li и др. [62] использовали АСМ для изучения топографии и толщины микропластиков, выделяемых из полипропиленовых бутылочек для кормления во время приготовления детской смеси. Изображения АСМ позволили авторам сделать вывод, что большая часть изолированных частиц возникла в результате разрушения бутылочек для кормления, поскольку их форма хлопьев и слоистая морфология были сравнимы с отслаиванием полипропилена. Химическая идентификация микропластиков может быть обеспечена при сочетании АСМ с колебательным спектроскопическим анализом.

Хотя идентификация микропластиков набирает обороты только в последние годы, эта группа методов входит в число новых подходов, которые, как предполагается, станут ценными для обнаружения и идентификации полимерных частиц в субмикрометровом и нанометровом диапазоне.

Инфракрасная спектроскопия

Среднее инфракрасное излучение с преобразованием Фурье (FT-MIR) — это распространенный метод идентификации микропластиков, обеспечивающий быстрое измерение, а также спектральный профиль с четко определенными характерными пиками для каждого полимера. Для анализа микропластиков в FTIR широко используются три различные рабочие конфигурации: пропускание, отражение и ослабленное полное отражение (НПВО) (рис. 5).

Рис. 5. Схематическая диаграмма распространенных режимов анализа FTIR [68]

Fig. 5. Schematic diagram of common FTIR analysis modes [68]



ИК-преобразование Фурье (FTIR) в режимах пропускания, отражения и ослабленного полного отражения (ATR) было разработано и применено для анализа микропластиков. Колебательные спектры можно интерпретировать вручную путем визуального анализа и идентификации характерных колебательных полос. В качестве альтернативы процесс можно автоматизировать за счет использования алгоритмов поиска в базе данных, позволяющих сравнивать полученный спектр с библиотекой справочных материалов [63, 64] или с помощью искусственного интеллекта, например многомерной классификации и настраиваемой модели случайных решений.

FTIR и μ FTIR широко используют для обнаружения и характеристики микропластиков в воде, в морских организмах и пище.

ATR-FTIR получает химическую информацию с пространственным разрешением микрометрового масштаба, используя локализацию затухающей волны электромагнитного поля на границе раздела с поверхностью призмы, используемой для достижения полного внутреннего отражения ИК-света. Высокий показатель преломления призмы, обычно состоящей из кристалла селенида германия или цинка, улучшает разрешающую способность до 4 раз. В системах визуализации μ -ATR-FTIR это приводит к теоретическому латеральному разрешению 3 мкм, если предположить, что расстояние между пикселями порядка 1,5 мкм.

Так как размер пикселя зависит от оптического увеличения, малый размер пикселя достигается за счет небольшого поля зрения FPA и более длительного времени анализа. Частица должна находиться в прямом контакте с кристаллом НПВО, поскольку затухающая волна распространяется за пределы кристалла и в образец только от 0,5 до 5 мкм. Поскольку система возвращает химическое изображение только тех частей образца, которые находятся в непосредственном контакте с призмой, μ -ATR-FTIR менее подвержен рассеянию по сравнению с μ FTIR в режиме отражения, что является преимуществом при анализе частиц неправильной формы.

Рамановская микроскопия

Рамановская микроскопия (PM) исследует молекулярные колебания внутри микропластика, которые можно использовать для идентификации типа полимера, поэтому она признана подходящим методом для характеристики микропластиков. В принципе и инфракрасная, и рамановская спектроскопия контролируют взаимодействие излучения и молекулярные колебания, но отличаются тем, как энергия фотона передается молекуле для изменения ее колебательного состояния [65].

Образец полимера освещается монохроматическим лазерным источником света, и собирается неупруго рассеянный свет от образца. PM, которая соединяет рамановский спектрометр с

оптическим микроскопом, позволяет собирать спектры из двумерной области при большом увеличении, расширяя ее полезность для исследования микропластиков. Например, конфокальная рамановская микроскопия использовалась для получения трехмерных изображений микропластиков внутри живых организмов, включая зоопланктон и крабов [66]. Кроме того, спектроскопию комбинационного рассеяния можно комбинировать с атомно-силовой микроскопией (раман-АСМ) для облегчения визуализации в наномасштабе.

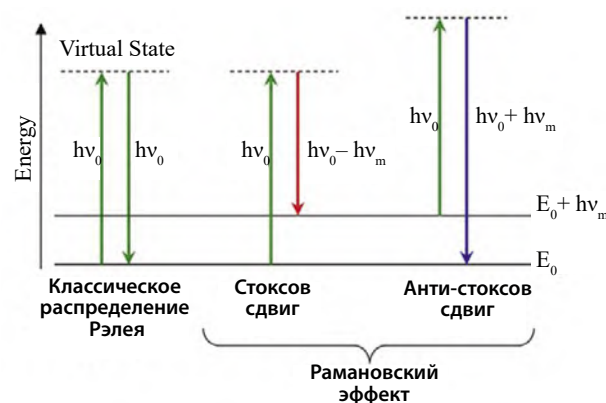
Рамановский эффект заключается в поглощении инфракрасного света. Когда фотоны света попадают в материю, могут происходить разные явления. Во-первых, свет может проходить через материал или может быть отражен без взаимодействия. Во-вторых, фотоны могут поглощаться во время возбуждения молекул или вызвать флуоресценцию. В-третьих, свет может рассеиваться либо упруго, либо неупруго с изменением энергии фотона. Это неупругое рассеивание фотонов впервые наблюдал в 1928 г. К.В. Раман, поэтому оно было названо эффектом комбинационного рассеивания света [21].

Схематический обзор процессов рассеивания и поглощения света молекулами показан на рисунке 6. Химические соединения существуют в различных энергетических состояниях. В электронных состояниях молекула может далее существовать в разных колебательных состояниях (0, 1, 2 и т. д.). Энергетические состояния могут меняться за счет поглощения или излучения энергии.

Принцип работы рамановской спектроскопии следующий: образец облучается светом, рассеянный свет собирается, направляется к детектору и преобразуется в спектр, который затем можно интерпретировать. В качестве источника света обычно используют монохроматические лазеры с длиной волны от видимого до ближнего ИК-диапазона. Интенсивность рамановского рассеянного света пропорциональна интенсивности (мощности) лазера. Таким образом, лазеры с меньшей длиной волны обычно вызывают более

Рис. 6. Изменения энергетического состояния при рэлеевском и рамановском светорассеивании [51]

Fig. 6. Changes in the energy state during Rayleigh and Raman light scattering [51]



интенсивный эффект комбинационного рассеивания. Однако более низкие длины волн лазера связаны с более высокой энергией фотонов, которая может быть достаточно высокой, чтобы вызвать флуоресценцию. В свою очередь, это одно из основных помех в рамановской спектроскопии, поскольку в спектрах преобладает интенсивный свет флуоресценции и слабые полосы комбинационного рассеивания света едва видны, невидимы или сигнал детектора насыщен флуоресцентным светом [67].

С другой стороны, некоторые распространенные типы детекторов (например, зарядовое связанное устройство, CCD) менее чувствительны в ближнем ИК-диапазоне, что приводит к недостаткам для лазеров с более длинными волнами [21]. Схема рамановской спектроскопии для обнаружения микропластика представлена на рисунке 7.

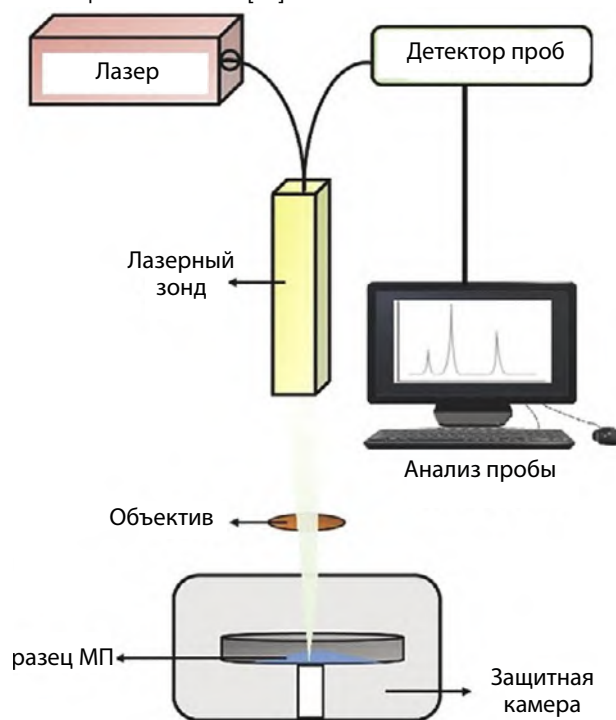
Идентификация полимерного типа микропластика в большинстве случаев достигается с помощью спектроскопии или термометрии. Термоаналитические методы, такие как массовая пиролизная газовая хроматография, спектрометрия (Py-GC/MS) или термическая экстракция и десорбция, газовая хроматография, масс-спектрометрия (TED-GC/MS), определение состава микропластика на основе термического разложения изделия из полимеров. В этих методах измеряется масса частиц, а не их размер с пределом обнаружения около 1 мкм (или иногда ниже) [68]. Напротив, спектроскопические методы, такие как рамановская спектроскопия или инфракрасное излучение с преобразованием Фурье (FT-MIR), позволяют получить данные о типе полимера посредством их спектроскопического анализа. Оба метода обеспечивают данные о размерах частиц с пределами обнаружения около 1 мкм и менее и 10–20 мкм соответственно.

В то время как рамановская спектроскопия дает информацию о структуре химического соединения, ИК-спектроскопия скорее описывает функциональные группы.

В таблице 1 суммированы преимущества и недостатки различных методик идентификации микропластика.

Рис. 7. Схема рамановской спектроскопии для обнаружения микропластика [21]

Fig. 7. Schematic diagram of Raman spectroscopy for microplastic detection [21]



Сравнительная оценка методов идентификации микропластиков с точки зрения точности (то есть степени детализации), времени, необходимого для сбора и анализа данных, представлена на рисунке 8. Относительное расположение каждого метода оценивается на основе литературных данных [69, 70].

Как правило, микропластик анализируют с помощью рамановской спектроскопии на уровне отдельных частиц или путем картирования слоя частиц на определенной площади.

Для получения образцов микропластики должны быть отделены от окружающей среды, сконцентрированы, а прилипшие остатки системы удалены. В противном случае последние могут привести к помехам во время измерения (например,

Таблица 1. Преимущества и недостатки различных методик идентификации микропластика

Table 1. Advantages and disadvantages of different microplastic identification methods

Методика	Преимущества	Недостатки
Визуальное наблюдение и (или) микроскопирование	Простота и легкость обнаружения; дешевая методика обнаружения	Высокая погрешность из-за субъективности эксперта; отсутствие информации о химическом составе; методика очень кропотливая
Инфракрасная микроскопия	Надежный и неразрушающий метод; более мелкие частицы (размером до 20 мкм) можно анализировать с помощью микроFTIR	Дорогое оборудование; необходима предварительная обработка образцов; чувствительность к воде
Рамановская спектроскопия	Может обнаруживать микропластик размером 1 мкм; нечувствительность к воде; надежный и неразрушающий метод; бесконтактный анализ	Искажение флуоресценцией; дорогое оборудование; необходима предварительная обработка образцов (особенно для пищевых продуктов)
Спектрометрия (Py-GC/MS) или термическая экстракция	Типы полимеров и добавок можно анализировать за один прогон; форма, размер и цвет образцов не влияют на результат	Отнимает много времени; разрушительный метод; недоступна морфологическая характеристика; форма, размер и цвет образцов недоступны; подходит для образцов с размерами > 100 мкм
Масс-спектрометрия (TED-GC/MS)	Более высокая чувствительность; ограниченная предварительная обработка проб	Разрушительный метод; отсутствует информация о форме, размере и количестве частиц микропластика

Рис. 8. Сравнительная оценка точности методов идентификации микропластиков

Fig. 8. Comparative evaluation of microplastic identification methods

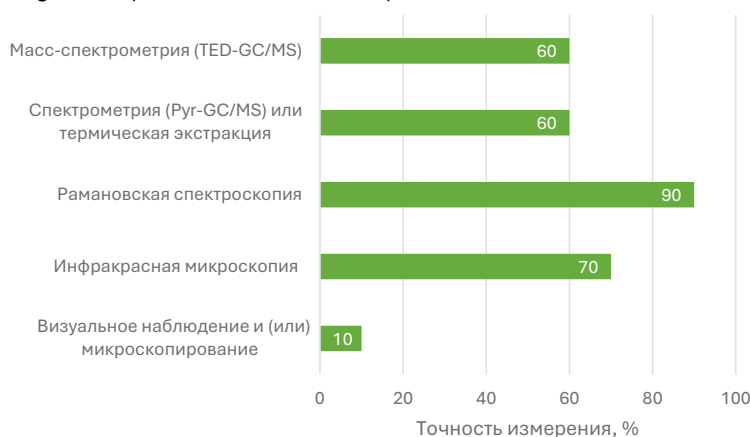
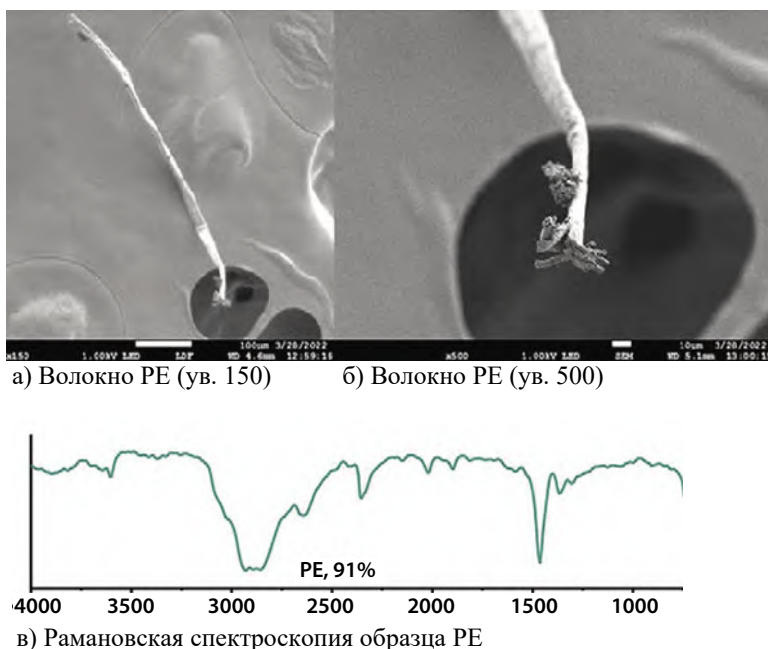


Рис. 9. Пример микроскопического изображения (а и б) и рамановская спектроскопия (в) микропластика в образцах пищевой соли [85]

Fig. 9. Example of microscopic image (a and b) and Raman spectroscopy (c) of microplastics in table salt samples [85]



экранирования спектра полимера, флуоресценции и наложения спектров). Это делается через один или несколько этапов пробоподготовки. Должны быть выбраны тип и объем пробоподготовки — в зависимости от матрицы окружающей среды, которую следует исследовать.

Из жидких матриц (обычно питьевой воды) микропластики выделяют фильтрованием. Для твердых и сыпучих материалов (соли, сахара, муки) используют просеивание. Кроме того, отделить микропластик от естественных твердых частицы можно флотацией. При анализе ткани рыб и мяса подойдет химическое или ферментативное расщепление для подготовки образца. Образцы обрабатывают щелочью (например, гидроксидом натрия или калия), кислотой (например, соляной, серной или азотной и их смесью) от нескольких часов до нескольких дней либо химическими

реагентами (например, перекисью водорода или реактивом Фентона) или ферментами [65].

Фактический рамановский анализ состоит из нескольких этапов, на которые в свою очередь влияют различные факторы. Во-первых, параметры измерения, такие как объектив, спектральный диапазон, длина волны и мощность лазера, спектральная решетка, время сбора данных и накопления. Во-вторых, режим измерения должен быть выбран из ручного одиночного измерения частиц — рамановское картирование или автоматическое обнаружение частиц. Количество анализируемых частиц должно быть выбрано таким образом, чтобы результаты были репрезентативными для всего образца. И наконец, спектры комбинационного рассеивания должны быть интерпретированы, а данные проанализированы [71].

В нескольких исследованиях изучали возможности рамановской спектроскопии для обнаружения микропластика в образцах пищевых продуктов. Например, было проведено исследование содержания микропластика в 17 образцах пищевой соли с использованием микрорамановской спектроскопии [72]. При длине волны лазера 785 нм и мощности менее 3 мВт в образцах обнаружены 41,6% полимеров, 23,6% пигментов, 5,5% аморфного углерода.

Пример микроскопического изображения и рамановская спектроскопия микропластика в образцах пищевой соли представлены на рисунке 9.

Аналогичные исследования были проведены с поваренной солью турецкого происхождения с использованием комбинации методов микроскопии и микрорамановской спектроскопии [73].

Исследования состава показали, что наибольшее количество полиэтилена (22,9%), за которым следует полипропилен (19,2%), было обнаружено в морской, озерной и каменной соли, их количество составило 16–84, 8–102 и 9–16 ед/кг, соответственно, при размерах частиц от 20 мкм до 5 мм (длина волны 785 нм).

Другое исследование было проведено с использованием микрорамановской спектроскопии при анализе микропластика в таких напитках, как вино [74]. При длине волны 633 нм и разрешении 100x микрорамановская спектроскопия идентифицировала частицы полиэтилена разного размера (~20 мкм) и цвета в белом вине. Кроме того, были обнаружены куски дерева, мусор и минеральные кристаллы.

В другом исследовании были продемонстрированы присутствие значительного количества синих пигментов и содержание полиамида после рамановской спектроскопии в холодном чае, безалкогольных и энергетических напитках [52]. Однако в большинстве этих исследований спектроскопию комбинационного рассеивания не рассматривали как единственный метод идентификации из-за высокой фоновой флуоресценции, фотодеградации образца и его старения, вызывающих изменение спектров. Комбинация комбинационного рассеивания света и FTIR или комбинационного рассеивания света и электронной микроскопии была успешной во многих исследованиях. Кроме того, только небольшая группа исследователей визуально идентифицировали микропластики с размером частиц 1 мкм с помощью рамановской спектроскопии. Это связано с тем, что фильтры, используемые для сканирования, нельзя напрямую обрабатывать пинцетом [65].

Таким образом, исследуются небольшие площади фильтра, что делает весь процесс трудоемким и длительным.

Еще одним замеченным барьером являются спектральные помехи, возникающие во время исследования. Например, В.Е. Овманн и соавт. (2018) сообщили о различных добавках, пигментах и соединениях, таких как хлорид кальция, фторид магния и диоксид кремния, в минеральной воде в бутылках, которые давали более сильные фоновые сигналы, противодействующие слабым сигналам комбинационного рассеивания [75].

Пиролизная газовая хроматография. Масс-спектрометрия

Пиролизная газовая хроматография в сочетании с масс-спектрометрией (Py-GC/MS) использовалась для идентификации микропластиков в различных матрицах образцов на основе продуктов их термического разложения [76]. Основным принципом Py-GC/MS заключается в мгновенном термическом разложении сополимеров на их мономеры и добавки при высоких температурах (> 500 °C) в инертной атмосфере и их разделении с помощью ГХ. Продукты разложения пластиковых полимеров дополнительно идентифицируются и количественно оцениваются с помощью МС с электронной ионизацией [77].

Py-GC/MS позволяет анализировать целые частицы микропластиков, что делает метод чувствительным к добавкам, таким как пигменты и стабилизаторы, а также к адсорбированным загрязнениям. Однако обнаружение этих дополнительных соединений может мешать интерпретации пирограммы. В последовательном Py-GC/MS температура повышается через определенные промежутки времени, что позволяет удалить добавки и остаточные мономеры из микропластиков [78].

Ранее был предложен метод двойного действия для термической десорбции адсорбированного органического соединения перед окончательным пиролизом [79]. Пиролиз показал более низкую чувствительность к полярным полимерам, которую можно преодолеть, применяя термический гидролиз или метилирование каплей гидроксида тетраметиламмония перед анализом.

На сегодняшний день количество исследований, сообщающих об использовании PyGC/MS для селективной идентификации и количественного определения микропластиков, всё еще невелико. Py-GC/MS использовали для анализа микропластика в морепродуктах [80] и питьевой воде [81], а также для определения поглощения микропластиков растениями огурца [82], что позволяет предположить его пригодность для анализа микропластиков в растительном материале. Однако Py-GC/MS не дает данных о размере, форме и количестве частиц, поэтому его часто используют в качестве метода, дополняющего ЭМ или μ FTIR.

Термогравиметрический анализ

Другим методом термического анализа является термогравиметрия с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии (TGA-DSC). Принцип TGA-DSC заключается в изменении теплоемкости при фазовом переходе полимера. Он популярен, потому что метод доступен, дешев и прост в использовании. При анализе дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) образец микропластика нагревается с четко определенной скоростью нагрева. Во время такого изменения температуры DSC рассчитывает разницу теплового потока между образцом и эталонным материалом. Маевский и др. (2016 г.) рассматривали TGA-DSC как потенциальный метод обнаружения PE и PP [70].

Тем не менее некоторые полимеры, такие как PVC, PA, не могли быть распознаны из-за перекрывающихся сигналов фазового перехода. TGA-DSC является особенно полезным инструментом для оценки степени кристалличности полимерного материала [69]. Однако для идентификации типов полимеров необходимы эталонные материалы.

Термическое разложение может осуществляться на воздухе либо в инертной атмосфере при постоянной температуре или по программе нагрева. TGA в сочетании с масс-спектрометрией может одновременно предоставлять количественные и качественные данные. В литературе сообщалось о TGA-МС как о простом, быстром и действенном методе скрининга для обнаружения микропластиков. Несмотря на способность обнаруживать и характеризовать различные микропластики, TGA-МС не является конкурентоспособным количественным методом с точки зрения точности. Предположительно из-за того, что передающие капилляры легко забиваются продуктами разложения пластика [83].

Еще одним ограничением ТГА-МС является отсутствие системы разделения. Это в сочетании с присутствием в одном и том же образце разных полимеров, имеющих одинаковую температуру разложения, делает интерпретацию результатов особенно сложной, возможно, препятствуя обнаружению и идентификации частей аналитов [84].

Физические (например, размер и цвет) и химические (например, молекулярная структура) свойства являются двумя ключевыми интересующими характеристиками для идентификации микропластика. Микроскопия — простой метод для сбора физических характеристик микропластиков. Она особенно хорошо подходит для крупных частиц. Для мелких частиц (размером < 1 мм) обычно предлагается микроскопический анализ в сочетании с химическим анализом, таким как колебательная спектроскопия или термический анализ. В настоящее время инфракрасная спектроскопия остается рутинным методом идентификации полимерного типа микропластиков в пробах окружающей среды из-за простоты и относительно короткого времени анализа.

При размере частицы микропластика < 20 мкм следует использовать рамановскую микроскопию. Автоматизированная спектроскопия (например, FPA-FTIR) лучше подходит для лабораторных образцов известных типов полимеров. Однако надежность программного обеспечения для сопоставления библиотек в автоматизированной процедуре сомнительна, поскольку вероятность успешного сопоставления во многом зависит от полноты спектральной библиотеки, а также от надежности алгоритма сопоставления. FTIR-изображение на основе FPA позволяет быстро получить данные, но время анализа довольно велико (11 часов для размера фильтра диаметром 11 мм). Хроматографический и термogravиметрический анализы реже используются для анализа микропластика и требуют много времени. Данные методы трудоемки и разрушительны, что не подходит для мелких частиц и не может дать информацию о форме или размере микропластика. Можно сделать предположение, что рамановская микроскопия и инфракрасная спектроскопия — это наиболее перспективные методики для идентификации микропластика в пищевых системах и сельскохозяйственной продукции.

Выводы/Conclusions

На текущий момент микропластики считаются одним из новых видов загрязнителей, и по-прежнему не хватает знаний и данных об их отделении и методах обнаружения для конкретных пищевых продуктов и других систем. Идентификация и количественная оценка микропластика в окружающей среде приобретают всё большее значение. Анализ определения микропластика состоит из двух этапов — физической характеристики частиц (например, с помощью оптического микроскопа) с последующей химической характеристикой для идентификации типов микропластика и идентификации самого микропластика.

Визуальная идентификация — самый простой и самый дешевый вид анализа для определения количественного содержания микропластика. Микропластики размером от 1 до 5 мм достаточно большие, чтобы их можно было различить невооруженным глазом (к примеру, пластиковые гранулы легко идентифицировать визуально в зависимости от прозрачности, формы и цвета частиц). Данная методика предназначена для оценки загрязнения окружающей среды и любых видов продукции микропластиком.

Идентификация под световым микроскопом используется для более мелкого микропластика (обычно < 1 мм). Увеличенные изображения с помощью микроскопии играют важную роль в характеристике определения неоднозначных и пластикоподобных частиц, поскольку они обеспечивают детализированные текстуры поверхности и структурные особенности объектов.

ИК-спектроскопия измеряет переходы между уровнями энергии колебаний молекул в измеряемом образце путем поглощения ИК-излучения. Среднее инфракрасное излучение с преобразованием Фурье (FTIR) — это распространенный метод идентификации микропластиков в образцах окружающей среды, пищевых системах и сельскохозяйственной продукции, обеспечивающий быстрое измерение, а также спектральный профиль с четко определенными характерными пиками для каждого полимера.

Рамановская спектроскопия представляет важный аналитический инструмент, обеспечивающий возможность идентификации мельчайших микропластиков. Данные о количестве микропластиков, их размер, форм и типы полимеров могут быть получены с помощью данной методики.

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. Coyle R., Hardiman G., O'Driscoll K. Microplastics in the marine environment: a review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2020; 2: 100010. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100010>
2. Bai C.-L., Liu L.-Y., Guo J.-L., Zeng L.-X., Guo Y. Microplastics in take-out food: Are we over taking it?. *Environmental Research*. 2022; 215(3): 114390. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114390>

REFERENCES

1. Coyle R., Hardiman G., O'Driscoll K. Microplastics in the marine environment: a review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2020; 2: 100010. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100010>
2. Bai C.-L., Liu L.-Y., Guo J.-L., Zeng L.-X., Guo Y. Microplastics in take-out food: Are we over taking it?. *Environmental Research*. 2022; 215(3): 114390. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114390>

3. 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>
4. Лукин А.А. Современные методы определения микропластика в пищевых системах. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2023; (2): 15–21. <https://elibrary.ru/kinuql>
5. Кухарчик Т.И., Чернюк В.Д. Загрязнение почв микропластиком при производстве пенополистирола. *Почвоведение*. 2022; (3): 370–380. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2203008X>
6. Zhou Y., Wang J., Zou M., Jia Z., Zhou S., Li Y. Microplastics in soils: a review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. *Science of The Total Environment*. 2020; 748: 141368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141368>
7. Wang Y. *et al.* The uptake and elimination of polystyrene microplastics by the brine shrimp, *Artemia parthenogenetica*, and its impact on its feeding behavior and intestinal histology. *Chemosphere*. 2019; 234: 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.267>
8. Stolte A., Forster S., Gerdt S., Schubert H. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast. *Marine Pollution Bulletin*. 2015; 99(1–2): 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.022>
9. Faure F., Demars C., Wieser O., Kunz M., de Alencastro L.F. Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environmental Chemistry*. 2015; 12(5): 582–591. <https://doi.org/10.1071/EN14218>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. Kamrin M.A. Phthalate Risks, Phthalate Regulation, and Public Health: a Review. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2009; 12(2): 157–174. <https://doi.org/10.1080/10937400902729226>
17. Jin Y., Lu L., Tu W., Luo T., Fu Z. Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of The Total Environment*. 2019; 649: 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>
18. Hou J. *et al.* Polystyrene microplastics lead to pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells via NLRP3/caspase-1 signaling pathway in rats. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021; 212: 112012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112012>
19. Geens T. *et al.* a review of dietary and non-dietary exposure to bisphenol-A. *Food and Chemical Toxicology*. 2012; 50(10): 3725–3740. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.07.059>
20. 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>
21. Collard F., Gilbert B., Eppe G., Parmentier E., Das K. Detection of Anthropogenic Particles in Fish Stomachs: An Isolation Method Adapted to Identification by Raman Spectroscopy. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2015; 69(3): 331–339. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0221-0>
3. 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>
4. 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). <https://elibrary.ru/kinuql>
5. Kukharchik T.I., Chernyuk V.D. Soil Pollution with Microplastic in the Impact Area of a Plant Producing Expanded Polystyrene. *Eurasian Soil Science*. 2022; 55(3): 377–386. <https://doi.org/10.1134/S1064229322030085>
6. Zhou Y., Wang J., Zou M., Jia Z., Zhou S., Li Y. Microplastics in soils: a review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. *Science of The Total Environment*. 2020; 748: 141368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141368>
7. Wang Y. *et al.* The uptake and elimination of polystyrene microplastics by the brine shrimp, *Artemia parthenogenetica*, and its impact on its feeding behavior and intestinal histology. *Chemosphere*. 2019; 234: 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.267>
8. Stolte A., Forster S., Gerdt S., Schubert H. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast. *Marine Pollution Bulletin*. 2015; 99(1–2): 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.022>
9. Faure F., Demars C., Wieser O., Kunz M., de Alencastro L.F. Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environmental Chemistry*. 2015; 12(5): 582–591. <https://doi.org/10.1071/EN14218>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. Kamrin M.A. Phthalate Risks, Phthalate Regulation, and Public Health: a Review. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2009; 12(2): 157–174. <https://doi.org/10.1080/10937400902729226>
17. Jin Y., Lu L., Tu W., Luo T., Fu Z. Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of The Total Environment*. 2019; 649: 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>
18. Hou J. *et al.* Polystyrene microplastics lead to pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells via NLRP3/caspase-1 signaling pathway in rats. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021; 212: 112012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112012>
19. Geens T. *et al.* a review of dietary and non-dietary exposure to bisphenol-A. *Food and Chemical Toxicology*. 2012; 50(10): 3725–3740. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.07.059>
20. 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>
21. Collard F., Gilbert B., Eppe G., Parmentier E., Das K. Detection of Anthropogenic Particles in Fish Stomachs: An Isolation Method Adapted to Identification by Raman Spectroscopy. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2015; 69(3): 331–339. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0221-0>

22. Ghosal S., Chen M., Wagner J., Wang Z.-M., Wall S. Molecular identification of polymers and anthropogenic particles extracted from oceanic water and fish stomach — a Raman micro-spectroscopy study. *Environmental Pollution*. 2018; 233: 1113–1124. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.014>
23. Wang L., Kaeppler A., Fischer D., Simmchen J. Photocatalytic TiO₂ Micromotors for Removal of Microplastics and Suspended Matter. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019; 11(36): 32937–32944. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06128>
24. Симонова А.К. Факторы, способствующие биодegradации упаковочных материалов. *Шаг в науку — 2021. Сборник статей победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых*. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2022; 136–142. <https://www.elibrary.ru/rwzama>
25. Hurley R.R., Lusher A.L., Olsen M., Nizzetto L. Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices. *Environmental Science & Technology*. 2018; 52(13): 7409–7417. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01517>
26. Miller M.E., Kroon F.J., Motti C.A. Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 123(1–2): 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.058>
27. Löder M.G.J. et al. Enzymatic Purification of Microplastics in Environmental Samples. *Environmental Science and Technology*. 2017; 51(24): 14283–14292. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03055>
28. Сухомесова К.Д. Обнаружение микропластика в мидиях. *Молодежная наука — 2023: технологии и инновации. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 10-летию науки и технологий в Российской Федерации*. Пермь: от и до. 2023; 2: 157–159. <https://elibrary.ru/meyszm>
29. Pivokonsky M., Cermakova L., Novotna K., Peer P., Cajthaml T., Janda V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of The Total Environment*. 2018; 643: 1644–1651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>
30. Zuccarello P. et al. Exposure to microplastics (< 10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study. *Water Research*. 2019; 157: 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.091>
31. Tong H., Jiang Q., Hu X., Zhong X. Occurrence and identification of microplastics in tap water from China. *Chemosphere*. 2020; 252: 126493. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126493>
32. Heo N.W. et al. Distribution of small plastic debris in cross-section and high strandline on Heungnam beach, South Korea. *Ocean Science Journal*. 2013; 48(2): 225–233. <https://doi.org/10.1007/s12601-013-0019-9>
33. Davidson K., Dudas S.E. Microplastic Ingestion by Wild and Cultured Manila Clams (*Venerupis philippinarum*) from Baynes Sound, British Columbia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2016; 71(2): 147–156. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0286-4>
34. 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>
35. Karlsson T.M. et al. Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: Method development and microplastic accumulation. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 122(1–2): 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.081>
36. 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>
37. Kosuth M., Mason S.A., Wattenberg E.V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLOS One*. 2018; 13(4): e0194970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
38. Lee E.-H., Lee S., Chang Y., Lee S.-W. Simple screening of microplastics in bottled waters and environmental freshwaters using a novel fluorophore. *Chemosphere*. 2021; 285: 131406. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131406>
39. 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>
40. 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>
22. Ghosal S., Chen M., Wagner J., Wang Z.-M., Wall S. Molecular identification of polymers and anthropogenic particles extracted from oceanic water and fish stomach — a Raman micro-spectroscopy study. *Environmental Pollution*. 2018; 233: 1113–1124. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.014>
23. Wang L., Kaeppler A., Fischer D., Simmchen J. Photocatalytic TiO₂ Micromotors for Removal of Microplastics and Suspended Matter. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019; 11(36): 32937–32944. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06128>
24. Simonova A.K. Factors contributing to the biodegradation of packaging Materials. *a step into science — 2021. Collection of articles by the winners of the competition of scientific research papers of students, postgraduates and young scientists*. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics. 2022; 136–142 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/rwzama>
25. Hurley R.R., Lusher A.L., Olsen M., Nizzetto L. Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices. *Environmental Science & Technology*. 2018; 52(13): 7409–7417. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01517>
26. Miller M.E., Kroon F.J., Motti C.A. Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 123(1–2): 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.058>
27. Löder M.G.J. et al. Enzymatic Purification of Microplastics in Environmental Samples. *Environmental Science and Technology*. 2017; 51(24): 14283–14292. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03055>
28. Sukhmesova K.D. Detection of microplastics in mussels. *Youth science — 2023: technology and innovation. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, postgraduates and students dedicated to the 10th anniversary of Science and Technology in the Russian Federation*. Perm: ot i do. 2023; 2: 157–159 (in Russian). <https://elibrary.ru/meyszm>
29. Pivokonsky M., Cermakova L., Novotna K., Peer P., Cajthaml T., Janda V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of The Total Environment*. 2018; 643: 1644–1651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>
30. Zuccarello P. et al. Exposure to microplastics (< 10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study. *Water Research*. 2019; 157: 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.091>
31. Tong H., Jiang Q., Hu X., Zhong X. Occurrence and identification of microplastics in tap water from China. *Chemosphere*. 2020; 252: 126493. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126493>
32. Heo N.W. et al. Distribution of small plastic debris in cross-section and high strandline on Heungnam beach, South Korea. *Ocean Science Journal*. 2013; 48(2): 225–233. <https://doi.org/10.1007/s12601-013-0019-9>
33. Davidson K., Dudas S.E. Microplastic Ingestion by Wild and Cultured Manila Clams (*Venerupis philippinarum*) from Baynes Sound, British Columbia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2016; 71(2): 147–156. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0286-4>
34. 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>
35. Karlsson T.M. et al. Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: Method development and microplastic accumulation. *Marine Pollution Bulletin*. 2017; 122(1–2): 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.081>
36. 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>
37. Kosuth M., Mason S.A., Wattenberg E.V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLOS One*. 2018; 13(4): e0194970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
38. Lee E.-H., Lee S., Chang Y., Lee S.-W. Simple screening of microplastics in bottled waters and environmental freshwaters using a novel fluorophore. *Chemosphere*. 2021; 285: 131406. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131406>
39. 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>
40. 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>

41. Renzi M., Blašković A. Litter & microplastics features in table salts from marine origin: Italian versus Croatian brands. *Marine Pollution Bulletin*. 2018; 135: 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.065>
42. 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>
43. Prata J.C., Reis V., Matos J.T.V., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. a new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT). *Science of The Total Environment*. 2019; 690: 1277–1283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.060>
44. 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>
45. Cole M. a novel method for preparing microplastic fibers. *Scientific Reports*. 2016; 6: 34519. <https://doi.org/10.1038/srep34519>
46. Shim W.J., Song Y.K., Hong S.H., Jang M. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Marine Pollution Bulletin*. 2016; 113(1–2): 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.049>
47. Prata J.C., Alves J.R., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. Major factors influencing the quantification of Nile Red stained microplastics and improved automatic quantification (MP-VAT 2.0). *Science of The Total Environment*. 2020; 719: 137498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137498>
48. Kankanige D., Babel S. Smaller-sized micro-plastics (MPs) contamination in single-use PET-bottled water in Thailand. *Science of The Total Environment*. 2020; 717: 137232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137232>
49. Lemarchand K., Parthuisot N., Catala P., Lebaron P. Comparative assessment of epifluorescence microscopy, flow cytometry and solid-phase cytometry used in the enumeration of specific bacteria in water. *Aquatic Microbial Ecology*. 2001; 25(3): 301–309. <https://doi.org/10.3354/ame025301>
50. Adan A., Alizada G., Kiraz Y., Baran Y., Nalbant A. Flow cytometry: basic principles and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2017; 37(2): 163–176. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1128876>
51. Schwaferts C., Niessner R., Elsner M., Ileva 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>
52. Shruti V.C., Pérez-Guevara F., Elizalde-Martínez I., Kutralam-Muniasamy G. First study of its kind on the microplastic contamination of soft drinks, cold tea and energy drinks - Future research and environmental considerations. *Science of The Total Environment*. 2020; 726: 138580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138580>
53. Vieira K.S. *et al.* Occurrence of microplastics and heavy metals accumulation in native oyster *Crassostrea gasar* in the Paranaguá estuarine system, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*. 2021; 166: 112225. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112225>
54. Wang Z.-M., Wagner J., Ghosal S., Bedi G., Wall S. SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Science of The Total Environment*. 2017; 603–604: 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.047>
55. Pan Z. *et al.* Microplastics in the Northwestern Pacific: Abundance, distribution, and characteristics. *Science of The Total Environment*. 2019; 650(2): 1913–1922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.244>
56. Vianello A. *et al.* Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2013; 130: 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022>
57. Dehghani S., Moore F., Akhbarizadeh R. Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017; 24(25): 20360–20371. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1>
58. Ruggeri F.S., Šneideris T., Vendruscolo M., Knowles T.P.J. Atomic force microscopy for single molecule characterisation of protein aggregation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2019; 664: 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2019.02.001>
59. Melo-Agustín P., Kozak E.R., Perea-Flores M.d.J., Mendoza-Pérez J.A. Identification of microplastics and associated contaminants using ultra high resolution microscopic and spectroscopic techniques. *Science of The Total Environment*. 2022; 828: 154434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154434>
41. Renzi M., Blašković A. Litter & microplastics features in table salts from marine origin: Italian versus Croatian brands. *Marine Pollution Bulletin*. 2018; 135: 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.065>
42. 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>
43. Prata J.C., Reis V., Matos J.T.V., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. a new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT). *Science of The Total Environment*. 2019; 690: 1277–1283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.060>
44. 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>
45. Cole M. a novel method for preparing microplastic fibers. *Scientific Reports*. 2016; 6: 34519. <https://doi.org/10.1038/srep34519>
46. Shim W.J., Song Y.K., Hong S.H., Jang M. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Marine Pollution Bulletin*. 2016; 113(1–2): 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.049>
47. Prata J.C., Alves J.R., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. Major factors influencing the quantification of Nile Red stained microplastics and improved automatic quantification (MP-VAT 2.0). *Science of The Total Environment*. 2020; 719: 137498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137498>
48. Kankanige D., Babel S. Smaller-sized micro-plastics (MPs) contamination in single-use PET-bottled water in Thailand. *Science of The Total Environment*. 2020; 717: 137232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137232>
49. Lemarchand K., Parthuisot N., Catala P., Lebaron P. Comparative assessment of epifluorescence microscopy, flow cytometry and solid-phase cytometry used in the enumeration of specific bacteria in water. *Aquatic Microbial Ecology*. 2001; 25(3): 301–309. <https://doi.org/10.3354/ame025301>
50. Adan A., Alizada G., Kiraz Y., Baran Y., Nalbant A. Flow cytometry: basic principles and applications. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2017; 37(2): 163–176. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1128876>
51. Schwaferts C., Niessner R., Elsner M., Ileva 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>
52. Shruti V.C., Pérez-Guevara F., Elizalde-Martínez I., Kutralam-Muniasamy G. First study of its kind on the microplastic contamination of soft drinks, cold tea and energy drinks - Future research and environmental considerations. *Science of The Total Environment*. 2020; 726: 138580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138580>
53. Vieira K.S. *et al.* Occurrence of microplastics and heavy metals accumulation in native oyster *Crassostrea gasar* in the Paranaguá estuarine system, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*. 2021; 166: 112225. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112225>
54. Wang Z.-M., Wagner J., Ghosal S., Bedi G., Wall S. SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Science of The Total Environment*. 2017; 603–604: 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.047>
55. Pan Z. *et al.* Microplastics in the Northwestern Pacific: Abundance, distribution, and characteristics. *Science of The Total Environment*. 2019; 650(2): 1913–1922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.244>
56. Vianello A. *et al.* Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2013; 130: 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022>
57. Dehghani S., Moore F., Akhbarizadeh R. Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017; 24(25): 20360–20371. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1>
58. Ruggeri F.S., Šneideris T., Vendruscolo M., Knowles T.P.J. Atomic force microscopy for single molecule characterisation of protein aggregation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2019; 664: 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2019.02.001>
59. Melo-Agustín P., Kozak E.R., Perea-Flores M.d.J., Mendoza-Pérez J.A. Identification of microplastics and associated contaminants using ultra high resolution microscopic and spectroscopic techniques. *Science of The Total Environment*. 2022; 828: 154434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154434>

60. Julienne F., Delorme N., Lagarde F. From macroplastics to microplastics: Role of water in the fragmentation of polyethylene. *Chemosphere*. 2019; 236: 124409. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124409>
61. Luo H., Zeng Y., Zhao Y., Xiang Y., Li Y., Pan X. Effects of advanced oxidation processes on leachates and properties of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 413: 125342. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125342>
62. 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>
63. Pimpke 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>
64. Corradini F., Beriot N., Huerta-Lwanga E., Geissen V. uFTIR: An R package to process hyperspectral images of environmental samples captured with μ FTIR microscopes. *SoftwareX*. 2021; 16: 100857. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100857>
65. Xu J.-L., Thomas K.V., Luo Z., Gowen A.A. FTIR and Raman imaging for microplastics analysis: State of the art, challenges and prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019; 119: 115629. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115629>
66. Ribeiro-Claro P., Nolasco M.M., Araújo C. Characterization of Microplastics by Raman Spectroscopy. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2017; 75: 119–151. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.10.001>
67. Мельник М.И. Анализ микрочастиц пластиков с помощью лазерной системы визуализации химического состава Agilent 8700 LDIR. *Аналитика*. 2022; 12(1): 68–77. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2022.12.1.68.77>
68. Chen G., Fu Z., Yang H., Wang J. An overview of analytical methods for detecting microplastics in the atmosphere. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2020; 130: 115981. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115981>
69. Rodríguez Chialanza M., Sierra I., Pérez Parada A., Fornaro L. Identification and quantitation of semi-crystalline microplastics using image analysis and differential scanning calorimetry. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2018; 25(17): 16767–16775. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1846-0>
70. Majewsky M., Bitter H., Eiche E., Horn H. Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of The Total Environment*. 2016; 568: 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.017>
71. Тимофеева И.В., Кустикова М.А. Анализ методов идентификации пластикового загрязнения компонентов окружающей среды. Земля и человек. Актуальные вопросы современного состояния окружающей среды. Сборник статей Межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной празднованию 90-летия Российского государственного гидрометеорологического университета. СПб.: РГГМУ. 2020; 230–233. <https://elibrary.ru/wkfsqs>
72. Karami A., Golieskardi A., Choo C.K., Larat V., Galloway T.S., Salamatinia B. The presence of microplastics in commercial salts from different countries. *Scientific Reports*. 2017; 7: 46173. <https://doi.org/10.1038/srep46173>
73. Gündoğdu S. Contamination of table salts from Turkey with microplastics. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2018; 35(5): 1006–1014. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1447694>
74. Prata C. *et al.* Identification of microplastics in white wines capped with polyethylene stoppers using micro-Raman spectroscopy. *Food Chemistry*. 2020; 331: 127323. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127323>
75. Oßmann B.E., Sarau G., Holtmannspötter H., Pischetsrieder M., Christiansen S.H., Dicke W. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*. 2018; 141: 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
76. Hermabessiere L. *et al.* Optimization, performance, and application of a pyrolysis-GC/MS method for the identification of microplastics. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2018; 410(25): 6663–6676. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1279-0>
77. Fischer M., Scholz-Böttcher B.M. Microplastics analysis in environmental samples — recent pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry method improvements to increase the reliability of mass-related data. *Analytical Methods*. 2019; 11(18): 2489–2497. <https://doi.org/10.1039/C9AY00600A>
60. Julienne F., Delorme N., Lagarde F. From macroplastics to microplastics: Role of water in the fragmentation of polyethylene. *Chemosphere*. 2019; 236: 124409. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124409>
61. Luo H., Zeng Y., Zhao Y., Xiang Y., Li Y., Pan X. Effects of advanced oxidation processes on leachates and properties of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 413: 125342. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125342>
62. 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>
63. Pimpke 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>
64. Corradini F., Beriot N., Huerta-Lwanga E., Geissen V. uFTIR: An R package to process hyperspectral images of environmental samples captured with μ FTIR microscopes. *SoftwareX*. 2021; 16: 100857. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100857>
65. Xu J.-L., Thomas K.V., Luo Z., Gowen A.A. FTIR and Raman imaging for microplastics analysis: State of the art, challenges and prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019; 119: 115629. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115629>
66. Ribeiro-Claro P., Nolasco M.M., Araújo C. Characterization of Microplastics by Raman Spectroscopy. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2017; 75: 119–151. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.10.001>
67. Melnik M.I. Analyzing Plastic Microparticles with the Agilent 8700 LDIR Laser Chemical Imaging System. *Analytics*. 2022; 12(1): 68–77 (in Russian). <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2022.12.1.68.77>
68. Chen G., Fu Z., Yang H., Wang J. An overview of analytical methods for detecting microplastics in the atmosphere. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2020; 130: 115981. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115981>
69. Rodríguez Chialanza M., Sierra I., Pérez Parada A., Fornaro L. Identification and quantitation of semi-crystalline microplastics using image analysis and differential scanning calorimetry. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2018; 25(17): 16767–16775. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1846-0>
70. Majewsky M., Bitter H., Eiche E., Horn H. Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of The Total Environment*. 2016; 568: 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.017>
71. Timofeeva I.V., Kustikova M.A. Analysis of methods for identifying plastic contamination of environmental components. *Earth and Man. Current issues of the current state of the environment. Collection of articles from the Interuniversity scientific and practical conference of students, graduate students, and young scientists dedicated to the celebration of the 90th anniversary of the Russian State Hydrometeorological University*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. 2020; 230–233 (in Russian). <https://elibrary.ru/wkfsqs>
72. Karami A., Golieskardi A., Choo C.K., Larat V., Galloway T.S., Salamatinia B. The presence of microplastics in commercial salts from different countries. *Scientific Reports*. 2017; 7: 46173. <https://doi.org/10.1038/srep46173>
73. Gündoğdu S. Contamination of table salts from Turkey with microplastics. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2018; 35(5): 1006–1014. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1447694>
74. Prata C. *et al.* Identification of microplastics in white wines capped with polyethylene stoppers using micro-Raman spectroscopy. *Food Chemistry*. 2020; 331: 127323. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127323>
75. Oßmann B.E., Sarau G., Holtmannspötter H., Pischetsrieder M., Christiansen S.H., Dicke W. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*. 2018; 141: 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
76. Hermabessiere L. *et al.* Optimization, performance, and application of a pyrolysis-GC/MS method for the identification of microplastics. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2018; 410(25): 6663–6676. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1279-0>
77. Fischer M., Scholz-Böttcher B.M. Microplastics analysis in environmental samples — recent pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry method improvements to increase the reliability of mass-related data. *Analytical Methods*. 2019; 11(18): 2489–2497. <https://doi.org/10.1039/C9AY00600A>

78. Burrows S.D., Frustaci S., Thomas K.V., Galloway T. Expanding exploration of dynamic microplastic surface characteristics and interactions. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2020; 130: 115993. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115993>
79. Okoffo E.D. *et al.* Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography — mass spectrometry. *Science of The Total Environment*. 2020; 715: 136924. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136924>
80. Ribeiro F. *et al.* Quantitative Analysis of Selected Plastics in High-Commercial-Value Australian Seafood by Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology*. 2020; 54(15): 9408–9417. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02337>
81. Kirstein I.V. *et al.* Drinking plastics? Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and Py-GCMS. *Water Research*. 2021; 188: 116519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116519>
82. Li C. *et al.* Quantification of Nanoplastic Uptake in Cucumber Plants by Pyrolysis Gas Chromatography / Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology Letters*. 2021; 8(8): 633–638. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00369>
83. Goedecke C. *et al.* Evaluation of thermoanalytical methods equipped with evolved gas analysis for the detection of microplastic in environmental samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020; 152: 104961. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104961>
84. Peñalver R., Arroyo-Manzanares N., López-García I., Hernández-Córdoba M. An overview of microplastics characterization by thermal analysis. *Chemosphere*. 2020; 242: 125170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125170>
85. Лукин А.А., Истригова Т.А. Сравнительный анализ рамановской спектроскопии для идентификации микропластика в пищевых системах. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2023; (3): 183–190. <https://www.elibrary.ru/uybxzc>
86. Лукин А.А. Методы разделения и извлечения микропластиков из пищевых систем. *Товаровед продовольственных товаров*. 2024; (10): 604–611. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2410-06>

ОБ АВТОРАХ

Александр Анатольевич Лукин^{1,2}

кандидат технических наук, доцент

lukin3415@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4753-3210>

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

²Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
пр-т Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

78. Burrows S.D., Frustaci S., Thomas K.V., Galloway T. Expanding exploration of dynamic microplastic surface characteristics and interactions. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2020; 130: 115993. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115993>

79. Okoffo E.D. *et al.* Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography — mass spectrometry. *Science of The Total Environment*. 2020; 715: 136924. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136924>

80. Ribeiro F. *et al.* Quantitative Analysis of Selected Plastics in High-Commercial-Value Australian Seafood by Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology*. 2020; 54(15): 9408–9417. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02337>

81. Kirstein I.V. *et al.* Drinking plastics? Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and Py-GCMS. *Water Research*. 2021; 188: 116519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116519>

82. Li C. *et al.* Quantification of Nanoplastic Uptake in Cucumber Plants by Pyrolysis Gas Chromatography / Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology Letters*. 2021; 8(8): 633–638. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00369>

83. Goedecke C. *et al.* Evaluation of thermoanalytical methods equipped with evolved gas analysis for the detection of microplastic in environmental samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020; 152: 104961. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104961>

84. Peñalver R., Arroyo-Manzanares N., López-García I., Hernández-Córdoba M. An overview of microplastics characterization by thermal analysis. *Chemosphere*. 2020; 242: 125170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125170>

85. Lukin A.A., Isrigova T.A. Comparative analysis of Raman spectroscopy for the identification of microplastics in food systems. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2023; (3): 183–190 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/uybxzc>

86. Lukin A.A. Methods for separating and extracting microplastics from food systems. *Food Products Commodity Expert*. 2024; (10): 604–611 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/igt-01-2410-06>

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander Anatolyevich Lukin^{1,2}

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

lukin3415@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4753-3210>

¹South Ural State Agrarian University,
13 Gagarin St., Troitsk, Chelyabinsk region, 457100, Russia

²South Ural State University (National Research
University),
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia



ГРУППА
КОМПАНИЙ
ВИК

С 1990 года

№1 среди производителей
ветеринарных препаратов
в СНГ

топ **21** в мире
среди производителей
ветеринарной фармацевтики

50+ стран экспорта, в том числе,
Европейский союз, являются
импортерами производимой
продукции

3 производственных комплекса
имеют сертификаты GMP,
признанные более чем
в 100 странах мира



О ПРОИЗВОДСТВЕ



О ГК ВИК

РОССИЙСКИЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЙ ХОЛДИНГ



КАТАЛОГ
«ВИК – ЗДОРОВЬЕ
ЖИВОТНЫХ»



CATALOGUE
VIC ANIMAL HEALTH

300+ НАИМЕНОВАНИЙ СОБСТВЕННОЙ
ПРОДУКЦИИ

20+ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ЛИНИЙ



Антибактериальные



Гормональные



Противопаразитарные



Железосодержащие



Нестероидные
противовоспалительные



Иммунобиологические



Витамины и кормовые
добавки, фитобиотики



Средства гигиены и
дезинфекции



Косметические средства по
уходу за животными



Косметика и БАДы для
людей фармкачества

- растворы для орального применения
- порошки
- гранулы
- таблетки
- стерильные инъекционные препараты
- жидкие и сухие кормовые добавки
- стерильные суспензии и порошки
- микрогранулы
- средства идентификации животных
- средства гигиены и дезинфекции

Н.Б. Кондратьев**Е.В. Казанцев** ✉**М.В. Осипов****А.Е. Баженова**

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

✉ conditerprom_lab@mail.ru

Поступила в редакцию: 07.11.2025

Одобрена после рецензирования: 13.01.2026

Принята к публикации: 28.01.2026

© Кондратьев Н.Б., Казанцев Е.В., Осипов М.В., Баженова А.Е.

Закономерности процессов влагопереноса в процессе хранения глазированных конфет со сбивными корпусами при различных температурах

РЕЗЮМЕ

Цель исследований — установить закономерности влияния свойств камедей на скорость миграции влаги в процессе хранения глазированных конфет с корпусами из кондитерских масс «Суфле» при различных температурах. Изготовить модельные образцы конфет различного химического состава, обосновать температурные режимы хранения конфет, определить физико-химические, структурно-механические и органолептические показатели качества, характеризующие процессы миграции влаги в образцах конфет, предложить математическое описание потерь влаги образцами при хранении для прогнозирования срока годности.

Объекты исследования — глазированные конфеты на основе сбивных масс «Суфле» с добавлением 0,25% камедей: ксантановой Е415, гуаровой Е412 и конжаковой Е425. Контрольный образец изготовлен без добавления камедей. Показатели качества конфет определяли стандартными физико-химическими, структурно-механическими методами, принятыми в исследовательской практике кондитерских пищевых систем. Хранение образцов проведено при температурах 18 °С и 28 °С. Показано, что при повышении температуры хранения на 10 °С скорость процессов влагопереноса увеличивается в 1,2–2 раза, а потеря влаги в значительной степени зависит от химического состава сбивной массы, использованной для изготовления конфет.

Ключевые слова: кондитерские изделия, температура хранения, массовая доля влаги, активность воды, камеди, срок годности

Для цитирования: Кондратьев Н.Б., Казанцев Е.В., Осипов М.В., Баженова А.Е. Закономерности процессов влагопереноса в процессе хранения глазированных конфет со сбивными корпусами при различных температурах. *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 128–134.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-128-134>

Nikolay B. Kondratiev**Egor V. Kazantsev** ✉**Maxim V. Osipov****Alla E. Bazhenova**

All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry — Branch of V.M. Gorbатов Federal Scientific Center of Food Systems of the RAS, Moscow, Russia

✉ conditerprom_lab@mail.ru

Received by the editorial office: 07.11.2025

Accepted in revised: 13.01.2026

Accepted for publication: 28.01.2026

© Kondratiev N.B., Kazantsev E.V., Osipov M.V., Bazhenova A.E.

Patterns of moisture transfer processes during storage of glazed sweets with whipped bodies at different temperatures

ABSTRACT

The objective of the research was to establish patterns of influence of gum properties on the rate of moisture migration during storage of glazed sweets with bodies made of “Souffle” candy masses at different temperatures. To make model samples of sweets with different chemical composition, to justify temperature conditions for storing sweets, to determine physicochemical, structural-mechanical and organoleptic quality indicators characterizing the processes of moisture migration in sweets samples, to propose a mathematical description of moisture loss by samples during storage to predict the shelf life. The objects of the study are glazed sweets based on “Souffle” whipped masses with the addition of 0.25% gums: xanthan E415, guar E412 and konjac E425. The control sample was made without the addition of gums. The quality indicators of the sweets were determined by standard physicochemical, structural-mechanical methods accepted in the research practice of confectionery food systems. The samples were stored at temperatures of 18 °C and 28 °C. It was shown that with an increase by 10 °C, the rate of moisture transfer processes increases by 1.2–2 times, and moisture losses largely depend on the chemical composition of the aerated mass used to make the candies.

Key words: confectionery, storage temperature, moisture content, water activity, gums, shelf life

For citation: Kondratiev N.B., Kazantsev E.V., Osipov M.V., Bazhenova A.E. Patterns of moisture transfer processes during storage of glazed sweets with whipped bodies at different temperatures. *Agrarian science*. 2026; 403(02): 128–134 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-128-134>

Введение/Introduction

Глазированные конфеты со сбивными корпусами представляют собой сложные сахаристые кондитерские изделия, состоящие из нескольких полуфабрикатов. Конфеты обладают пенообразной структурой, мягкой слегка затяжной консистенцией, приятным вкусом, ароматом и относятся к группе изделий с промежуточной влажностью [1, 2].

Качество глазированных конфет при хранении определяется такими факторами, как химический состав, условиями технологической обработки рецептурных компонентов, свойствами упаковочных материалов, условиями логистики, хранения и реализации [3, 4]. При этом одним из наиболее значимых факторов является температура хранения, определяющая срок годности различных кондитерских полуфабрикатов и изделий. При температурных колебаниях исходные высокие качественные характеристики конфет значительно снижаются, что приводит к утрате хранимостпособности и уменьшению срока годности, а также жалобам потребителей [5, 6].

Сроки годности и условия хранения кондитерских изделий устанавливаются изготовителем, который несет ответственность за качество выпускаемой им продукции. Обоснованные условия хранения должны обеспечивать соответствие изделий требованиям технических регламентов в течение всего срока годности. Поэтому исследование закономерностей процессов миграции влаги в глазированных конфетах со сбивными корпусами при различных температурах хранения актуальны.

Для установления срока годности кондитерских изделий в Российской Федерации используются Методические указания МУК 4.2.1847-04¹, регламентирующие исследования микробиологических, санитарно-химических и органолептических показателей пищевых продуктов в условиях хранения, предусмотренных технической документацией. Для установления срока годности в условиях «ускоренного старения» разработан ГОСТ Р 70412-2022².

Глазированные конфеты со сбивными корпусами при хранении в значительной степени подвержены процессам влагопереноса. Во многих научных публикациях показаны результаты исследований влияния температуры на направление и скорость таких процессов. Метод Аррениуса использован для оценки скорости химических изменений в процессе хранения ядер орехов при температурах 20 °С, 30 °С и 40 °С. Установлено влияние температуры на органолептические характеристики. Предложенная математическая модель может применяться для прогнозирования качества исследованных образцов глазированных конфет [7, 8].

Метод Аррениуса был применен для ускоренного прогнозирования срока годности пирожных, жевательных конфет при температурах 25 °С, 35 °С и 45 °С. В качестве маркеров степени порчи таких изделий применялись содержание свободных жирных кислот, массовая доля влаги и активность воды, органолептические и микробиологические характеристики [9, 10].

Для изделий с пенообразной структурой, в том числе с добавлением влагоудерживающих добавок (загустителей), показано, что при увеличении температуры хранения на 10 °С скорость миграции влаги увеличивается в 2,1 раза, что позволяет управлять сроком годности [11, 12]. Для повышения устойчивости пищевых систем, повышения их вязкости, влагоудерживающей, жироудерживающей, жироземмулирующей и стабилизирующей способностей использованы гуаровая и ксантановая камеди [13].

Увеличение сроков годности мучных кондитерских изделий на примере кексов, пряников достигнуто добавлением ксантановой камеди. При добавлении влагоудерживающих пищевых добавок происходит улучшение микробиологических показателей в процессе их хранения, что связано с уменьшением активности воды и доступности влаги [14, 15]. Применение йотта-каррагинанов предотвращает синерезис и уменьшает потери влаги при хранении пищевых продуктов [16].

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что при изменении температуры хранения кондитерских изделий риски физико-химических изменений, развития микроорганизмов увеличиваются, в том числе из-за изменения активности воды в различных частях изделия. Поэтому контроль массовой доли влаги и активности воды является актуальным [17].

Данная работа посвящена закономерностям процессов влагопереноса в процессе хранения глазированных конфет со сбивными корпусами при различных температурах. Ранее авторами работы [18] показано улучшение стабильности конфетных масс при добавлении композиции «желатин — гуммиарабик». Для зефира использование крахмальной патоки позволяет обеспечить заданную структуру и консистенцию массы благодаря ассоциации молекул сухого яичного белка, а повышение температуры до 60 °С способствовало увеличению объема пены на 9% [19, 20].

Применение пюре ягод в качестве пребиотиков позволяет повысить срок годности зефира, что можно объяснить водосвязывающими свойствами пектинов в составе такого пюре [21].

Таким образом, результаты проведенных ранее исследований показывают, что исследования процессов миграции влаги при хранении глазированных конфет со сбивными корпусами являются актуальными.

¹ МУК 4.2.1847-04 Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Методические указания. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России.

² ГОСТ Р 70412-2022 Изделия кондитерские. Руководящие указания по установлению и подтверждению срока годности.

Цель работы — установить закономерности влияния свойств камедей на скорость миграции влаги в процессе хранения глазированных конфет с корпусами из конфетных масс «Суфле» при различных температурах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: изготовить модельные образцы конфет различного химического состава, обосновать температурные режимы хранения конфет, определить физико-химические, структурно-механические и органолептические показатели качества, характеризующие процессы миграции влаги в образцах конфет, предложить математическое описание потерь влаги образцами при хранении для прогнозирования срока годности.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Работа проведена в лаборатории ВНИИ КП — филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН (г. Москва, Россия) в 2025 году.

Объектами исследования являлись глазированные конфеты на основе сбивных масс «Суфле» с добавлением 0,25% камедей: ксантановой E415, гуаровой E412 и конжаковой E425.

Контрольный образец изготовлен без добавления камедей.

Конфеты, глазированные кондитерской глазурью на основе жиров заменителей масла какао нетемперируемых лауринового типа, представлены на рисунке 1.

Состав конфет со сбивными корпусами «Суфле» представлен в таблице 1.

Физико-химические свойства конфет определяли по следующим методикам: массовая доля влаги — ГОСТ 5900-2014³, активность воды — ГОСТ ISO 21807-2015⁴ — с использованием анализатора AquaLab 4TE (Decagon Devices, США). Органолептические показатели — по ГОСТ 4570-2014⁵ и ГОСТ 5897-90⁶ — с использованием метода построения профилограмм⁷ (вкус, запах, структура, форма, поверхность, цвет, вид в изломе). Для каждого показателя использована 5-балльная шкала: 5 — отлично, 4 — хорошо, 3 — удовлетворительно, 2 — плохо, 1 — очень плохо (несоответствие всем показателям). Числовые значения выражены как среднее значение ($n = 5$); $SD \pm 0,5\%$ при достоверном различии значений на уровне 95% ($p < 0,05$).

Жирнокислотный состав жировой фракции глазури — по ГОСТ Р 54686-2011 Изделия кондитерские. Метод определения массовой доли насыщенных жирных кислот. Образцы конфет упаковывали в полипропиленовую пленку (БOPP) с коэффициентом паропроницаемости $340 \text{ см}^3 \cdot \text{см} / \text{м}^2 \cdot \text{сут} \cdot \text{атм}$.

Рис. 1. Модельные образцы глазированных конфет со сбивными корпусами «Суфле»

Fig. 1. Model samples of glazed sweets with whipped bodies “Soufflé”



Таблица 1. Рецептура конфет со сбивными корпусами «Суфле», изготовленных с использованием камедей
Table 1. Recipe for candies with whipped bodies “Soufflé” made using gums

Наименование сырья и полуфабрикатов	Содержание сухих веществ, %	Расход сырья на 1 т готовой продукции, кг	
		в натуре	в сухих веществах
Рецептура конфет			
Корпус	80,0	653,35	522,68
Глазурь	99,1	351,85	348,68
Итого	–	1005,20	871,36
Выход	86,7	1000,00	867,00
Рецептура корпуса			
Сахаро-паточно-агаровый сироп	85,0	463,87	394,29
Молоко сгущенное	74,0	81,58	60,37
Заменитель молочного жира	99,9	72,37	72,30
Раствор сухого яичного белка	12,0	47,58	5,71
Кислота молочная	98,0	1,66	1,63
Итого	–	667,06	534,30
Выход	80,0	657,86	526,29
Рецептура сахаро-паточно-агарового сиропа			
Сахар белый	99,85	279,36	278,94
Камедь	89,0	1,66	1,48
Патока	78,0	140,49	109,58
Агар	85,0	7,38	6,27
Итого	–	428,89	396,27
Выход	85,0	463,87	394,29
Раствор сухого яичного белка			
Сухой яичный белок	85,4	6,72	5,74
Итого	–	6,72	5,74
Выход	12,0	47,58	5,71

и с толщиной 20 мкм, помещали на хранение в климатическую камеру Climacell 404 (Чехия) и термостат Sanyo Mir 262 (Япония) при температурах 18 °C и 28 °C и относительной влажности воздуха 40%.

Температура хранения более 28 °C для конфет не позволяла сохранить форму изделий, поэтому выбрана максимальная возможная температура, обеспечивающая наибольшую скорость массопереноса.

³ ГОСТ 5900-2014 Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли влаги и сухих веществ.

⁴ ГОСТ ISO 21807-2015 Микробиология пищевой продукции и кормов. Определение активности воды.

⁵ ГОСТ 4570-2014 Конфеты. Общие технические условия.

⁶ ГОСТ 5897-90 Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей.

⁷ Покровский А.В. Краткий обзор современных международных методов органолептического анализа. Москва. 1999; 27.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Конфеты глазированные со сбивными корпусами «Суфле» в процессе хранения подвержены преимущественно физическим изменениям, таким как черствение, изменение формы, «поседение» поверхности, которые обусловлены процессами влагопереноса. Пищевые загустители могут быть использованы для уменьшения скорости таких процессов.

Использованные загустители различаются физико-химическими характеристиками, которые оказывают влияние на органолептические показатели конфет и скорость процессов влагопереноса.

Для оценки качества использованных загустителей проведены исследования показателя растекаемости изготовленных модельных масс, содержащих 20% сахара белого, 0,5% камедей и 18% технологической воды при температуре 18 °С. Результаты представлены в таблице 2.

Значения растекаемости модельных масс находились в узком диапазоне — 2,4–4,6 см. Различная растекаемость связана с отличиями молекулярной структуры этих загустителей. Исследованные загустители применяли для изготовления сбивных корпусов конфет, которые после этапа структурирования покрывали глазурью, изготовленной на основе заменителей масла какао нетемпературе лауринового типа.

Для оценки риска изменения органолептических показателей проведены исследования жирнокислотного состава ее жировой фракции (табл. 3).

Наличие средномолекулярных жирных кислот в жировой фракции глазури, таких как лауриновая и миристиновая, повышает риск ухудшения органолептических показателей конфет при хранении изделий. Такая глазурь подвержена риску появления так называемого «мыльного» привкуса в процессе хранения, обусловленного образованием свободных средномолекулярных жирных кислот в результате гидролитических реакций молекул жиров. Такие кислоты в свободном виде обладают неприятным привкусом и обуславливают органолептическую порчу глазированных изделий.

Свободная влага, которая может образоваться из сбивных масс при хранении, приведет к порче кондитерских изделий. Поэтому для уменьшения скорости влагопереноса при изготовлении сбивных масс были использованы загустители с влагоудерживающими свойствами.

Результаты исследования массовой доли влаги и активности воды глазированных конфет для прогнозирования развития микробиологической порчи глазированных конфет при хранении представлены в таблице 4.

Таблица 2. Показатель растекаемости модельных масс, содержащих камеди

Table 2. Spreadability index of modeling masses containing gums

Наименование камеди	Растекаемость по Боствику, см
Ксантановая	4,5 ± 0,2
Гуаровая	4,6 ± 0,2
Конжаковая	2,4 ± 0,2

Таблица 3. Жирнокислотный состав жировой фракции глазури

Table 3. Fatty acid composition of the fat fraction of the glaze

Наименование жирной кислоты	Условное обозначение	Содержание жирной кислоты, %
Каприловая	8:0	3,0 ± 0,1
Каприновая	10:0	2,7 ± 0,1
Лауриновая	12:0	48,5 ± 0,1
Миристиновая	14:0	15,7 ± 0,1
Пальмитиновая	16:0	10,3 ± 0,1
Стеариновая	18:0	3,1 ± 0,1
Олеиновая	18:1	13,3 ± 0,1
Линолевая	18:2	1,2 ± 0,1

Таблица 4. Массовая доля влаги и активность воды глазированных конфет со сбивными корпусами «Суфле»

Table 4. Mass fraction of moisture and water activity of glazed sweets with whipped bodies “Souffle”

Образец конфет	Массовая доля влаги, %	Активность воды
Контроль без камеди	12,8 ± 0,5	0,760 ± 0,01
0,25% конжаковой	13,0 ± 0,5	0,727 ± 0,01
0,25% ксантановой	15,3 ± 0,5	0,740 ± 0,01
0,25% гуаровой	13,4 ± 0,5	0,742 ± 0,01

Таблица 5. Микробиологические показатели глазированных конфет

Table 5. Microbiological indicators of glazed sweets

Наименование образца	Содержание микроорганизмов (КОЕ/г) в процессе хранения при температуре 18 °С, недели								
	КМАФАнМ			плесень			дрожжи		
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
Контроль	6,0×10 ²	2,0×10 ²	4,5×10 ²	10 ± 1	10 ± 1	120 ± 10	0	0	0
Ксантановая камедь	5,0×10 ²	1,3×10 ²	4,0×10 ²	10 ± 1	20 ± 1	120 ± 10	0	0	0
Гуаровая камедь	7,0×10 ²	1,6×10 ²	4,2×10 ²	10 ± 1	20 ± 1	130 ± 10	0	0	0
Конжаковая камедь	5,0×10 ²	1,0×10 ²	2,0×10 ²	10 ± 1	20 ± 1	120 ± 10	0	0	0
При температуре 28 °С, недели									
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
Контроль	6,0×10 ²	2,5×10 ²	6,0×10 ²	10 ± 1	120 ± 10	130 ± 10	0	0	0
Ксантановая камедь	5,0×10 ²	1,7×10 ²	5,7×10 ²	10 ± 1	120 ± 10	120 ± 10	0	0	0
Гуаровая камедь	7,0×10 ²	3,6×10 ²	8,2×10 ²	10 ± 1	130 ± 10	140 ± 10	0	0	0
Конжаковая камедь	5,0×10 ²	2,2×10 ²	4,3×10 ²	10 ± 1	110 ± 10	120 ± 10	0	0	0

Поэтому были проведены исследования микробиологических показателей глазированных конфет со сбивными корпусами «Суфле». Результаты исследований приведены в таблице 5.

После 8 недель хранения при температуре 18 °С количество КМАФАнМ в конфетах с конжаковой камедью увеличилось приблизительно в 4 раза, а количество плесени — в 2 раза. В контрольном образце количество КМАФАнМ увеличилось за этот период в 7,5 раз.

Понижение микробиологических показателей изделий с камедями обусловлено понижением доступности влаги.

Миграция связанной влаги из капилляров сбивной массы приводит к увеличению активности воды, что способствует увеличению риска микробиологической порчи изделий.

При повышении температуры до 28 °С интенсивность микробиологических процессов возрастает. При уменьшении массовой доли влаги в процессе хранения изделий часть микроорганизмов переходит в споровое состояние, что увеличивает риск кондитерских изделий при дальнейшем хранении. Поэтому было исследовано количество спорообразующих микроорганизмов глазированных конфет с корпусами из конфетной массы «Суфле».

Количество спорообразующих микроорганизмов в образцах сбивной массы после 8 недель хранения при температуре 18 °С увеличилось в 4 раза. Результаты исследований представлены в таблице 6.

Содержание спорообразующих микроорганизмов в глазури после 8 недель хранения конфет увеличилось в 17 раз. В процессе жизнедеятельности микроорганизмов в окружающую среду выделяются различные ферменты, в том числе липолитические. После двух месяцев хранения конфет появился «мыльный» привкус глазури, обусловленный гидролитическим расщеплением жиров глазури. В процессе хранения (т, нед.) происходит уменьшение массовой доли влаги с различной скоростью для конфет с добавлением камедей в массу «Суфле» (рис. 2).

Получены математические зависимости массовой доли влаги W от длительности хранения конфет при температуре 18 °С:

Таблица 6. Содержание спорообразующих микроорганизмов частей глазированных конфет с корпусами из сбивной массы «Суфле»

Table 6. Content of spore-forming microorganisms in parts of glazed sweets with bodies made of whipped mass «Souffle»

Наименование	Содержание спорообразующих микроорганизмов (КОЕ/г) в процессе хранения конфет при температуре 18 °С		
	0 нед.	4 нед.	8 нед.
Сбивная масса	10 ± 1	20 ± 1	40 ± 1
Глазурь	10 ± 1	70 ± 1	$1,7 \times 10^2 \pm 1$

• для контрольного образца: $W = -0,09t + 11,07$ ($R_i = 0,94$);

• с использованием ксантановой камеди: $W = -0,08t + 13,9$ ($R_i = 0,99$);

• с использованием гуаровой камеди: $W = -0,06t + 11,7$ ($R_i = 0,98$);

• с использованием конжаковой камеди: $W = -0,03t + 11,1$ ($R_i = 0,96$);

На основе полученных зависимостей установлено, что использование конжаковой камеди приводит к уменьшению скорости влагопереноса в 3 раза, при этом ксантановая и гуаровая камеди обладали меньшим эффектом удерживания влаги при хранении изделий.

Математические зависимости при температуре 28 °С:

• для контрольного образца: $W = -0,11t + 11,1$ ($R_i = 0,97$);

• с использованием ксантановой камеди: $W = -0,11t + 13,8$ ($R_i = 0,99$);

• с использованием гуаровой камеди: $W = -0,12t + 11,7$ ($R_i = 0,99$);

• с использованием конжаковой камеди: $W = -0,05t + 11,2$ ($R_i = 0,98$).

При увеличении температуры хранения до 28 °С скорость влагопереноса контрольного образца возросла в 1,2 раза. Наименьшая скорость влагопереноса выявлена у образца, изготовленного с использованием конжаковой камеди, которая увеличилась приблизительно в 2 раза по сравнению с конфетами, хранившимися при температуре 28 °С.

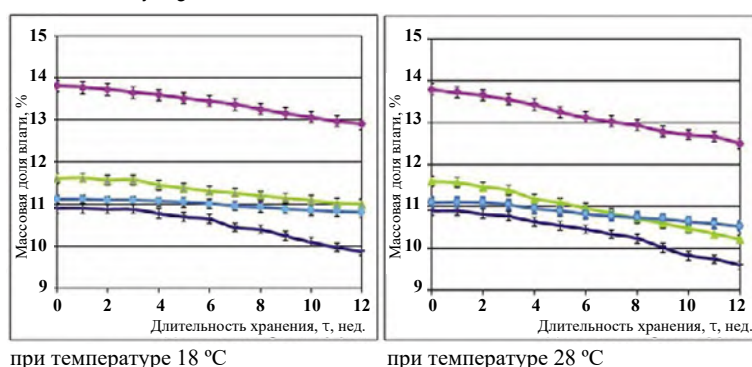
Полученные математические зависимости позволяют прогнозировать массовую долю влаги при хранении глазированных конфет со сбивными корпусами «Суфле».

Используя полученные закономерности, можно установить момент времени с минимально возможной массовой долей влаги, характеризующей их срок годности для каждой группы изделий. Изменение массовой доли влаги при хранении обусловило ухудшение органолептических показателей формы и поверхности конфет, изготовленных с использованием камедей.

Использование конжаковой камеди способствует лучшему сохранению

Рис. 2. Изменение массовой доли влаги конфет глазированных со сбивными корпусами «Суфле»: — контроль, — ксантановая камедь, — гуаровая камедь, — конжаковая камедь

Fig. 2. Change in the mass fraction of moisture in glazed sweets with whipped bodies «Souffle»: — control, — xanthan gum, — guar gum, — konjac gum



структуры корпусов глазированных конфет со сбивными массами (рис. 3).

Установлено, что наилучшие органолептические показатели в конце наблюдаемого периода хранения выявлены у глазированных конфет со сбивными корпусами, изготовленными с использованием конжаковой и гуаровой камедей. Вкус и запах практически не зависят от вида использованных камедей. Полученные результаты хорошо коррелируются с результатами работ [11, 15].

Уменьшение массовой доли влаги при хранении конфет, изготовленных с использованием сбивных масс без добавления камедей, обусловило ухудшение формы конфет, способствуя изменению рельефа поверхности сбивной массы, что может привести к нежелательному «отслоению» глазури.

Выводы/Conclusions

Проведены исследования влияния камедей на скорость миграции влаги в процессе хранения глазированных конфет с корпусами из конфетных масс «Суфле» при различных температурах.

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

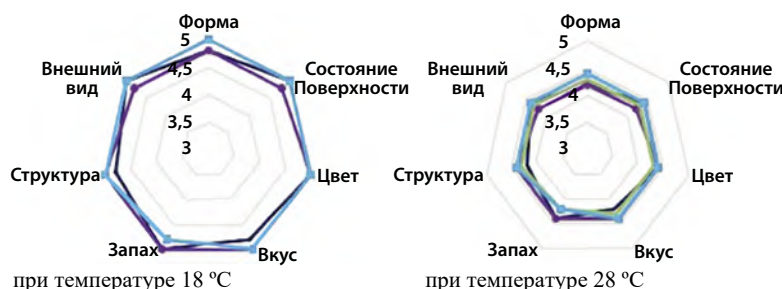
Работа выполнена в рамках госзадания № FGUS-2022-0007 «Научные основы формирования кондитерских изделий с заданным нутриентным составом как многофазных гетерогенных дисперсных систем, в том числе с использованием кавитационных воздействий, и обоснование принципов обеспечения их сохранности».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ungure E., Straumīte E., Muižniece-Brasava S., Dukalska L. Consumer attitude and sensory evaluation of marshmallow. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*. 2013; 67(4–5): 442–447. <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0077>
2. Казанцев Е.В., Кондратьев Н.Б., Руденко О.С., Петрова Н.А., Белова И.А. Формирование пенообразной структуры кондитерских изделий. *Пищевые системы*. 2022; 5(1): 64–69. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-64-69>
3. Кондратьев Н.Б., Казанцев Е.В. Изменение качества кондитерских изделий с фруктовой начинкой в процессе хранения. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2023; (5–6): 77–81. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.5-6.12>
4. Kumari S., Boora S. Comparison of the Optimum Barrier Properties of PET/PE and BOPP/PP Laminates Structures. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024; 12(22s): 1498–1503.
5. Mardani M. et al. Study on foaming, rheological and thermal properties of gelatin-free marshmallow. *Food Hydrocolloids*. 2019; 93: 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.033>
6. Abdul Halim H.S., Selamat J., Mirhosseini S.H., Hussain N. Sensory preference and bloom stability of chocolate containing cocoa butter substitute from coconut oil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2019; 18(4): 443–448. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.005>
7. Prabhakar H., Bock C.H., Kerr W.L., Kong F. Pecan color change during storage: Kinetics and Modeling of the Processes. *Current Research in Food Science*. 2022; 5: 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.01.015>

Рис. 3. Органолептические показатели конфет глазированных со сбивными корпусами «Суфле» после 8 недель хранения: — контроль, — ксантановая камедь, — гуаровая камедь, — конжаковая камедь

Fig. 3. Organoleptic characteristics of glazed sweets with whipped bodies «Souffle» after 8 weeks of storage: — control, — xanthan gum, — guar gum, — konjac gum



Установлено, что при повышении температуры хранения конфет от 18 до 28 °С скорость влагопереноса увеличивается в 1,2–2,0 раза. При этом камеди практически не оказывают влияния на изменение органолептических показателей вкуса и запаха конфет, изготовленных с использованием сбивных масс, в процессе их длительного хранения. Однако потери влаги при хранении конфет, изготовленных с использованием сбивных масс без добавления камедей, обусловили ухудшение формы конфет, способствуя «втягиванию» поверхности или «отслоению» глазури.

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 work was carried out within the framework of the state task No. FGUS-2022-0007 “Scientific foundations of the formation of confectionery products with a given nutrient composition as multiphase heterogeneous dispersed systems, including using cavitation effects, and substantiation of the principles of ensuring their safety.”

REFERENCES

1. Ungure E., Straumīte E., Muižniece-Brasava S., Dukalska L. Consumer attitude and sensory evaluation of marshmallow. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*. 2013; 67(4–5): 442–447. <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0077>
2. Kazantsev E.V., Kondratiev N.B., Rudenko O.S., Petrova N.A., Belova I.A. Formation of a foamy structure of confectionery pastille products. *Food systems*. 2022; 5(1): 64–69 (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-64-69>
3. Kondratiev N.B., Kazantsev E.V. Changing the quality of confectionery with fruit filling during storage. *News of universities. Food Technology*. 2023; (5–6): 77–81 (in Russian). <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.5-6.12>
4. Kumari S., Boora S. Comparison of the Optimum Barrier Properties of PET/PE and BOPP/PP Laminates Structures. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024; 12(22s): 1498–1503.
5. Mardani M. et al. Study on foaming, rheological and thermal properties of gelatin-free marshmallow. *Food Hydrocolloids*. 2019; 93: 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.033>
6. Abdul Halim H.S., Selamat J., Mirhosseini S.H., Hussain N. Sensory preference and bloom stability of chocolate containing cocoa butter substitute from coconut oil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2019; 18(4): 443–448. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.005>
7. Prabhakar H., Bock C.H., Kerr W.L., Kong F. Pecan color change during storage: Kinetics and Modeling of the Processes. *Current Research in Food Science*. 2022; 5: 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.01.015>

8. Conte L., Milani A., Calligaris S., Rovellini P., Lucci P., Nicoli M.C. Temperature Dependence of Oxidation Kinetics of Extra Virgin Olive Oil (EVOO) and Shelf-Life Prediction. *Foods*. 2020; 9(3): 295. <https://doi.org/10.3390/foods9030295>
9. Choosuk N., Meesuk P., Renumarn P., Phungamngoen C., Jakkranuhwat N. Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. *Processes*. 2022; 10(7): 1392. <https://doi.org/10.3390/pr10071392>
10. Renumarn P., Choosuk N. Influence of Packaging and Storage Conditions on the Quality and Shelf-life of Chewy Santol (Kraton-Yee) Candies. *E3S Web of Conferences*. 2020; 141: 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014102002>
11. Казанцев Е.В., Кондратьев Н.Б., Осипов М.В., Петрова Н.А., Лаврухин М.А. Влияние упаковки и температуры на сохранность кондитерских изделий пенообразной структуры. *Пищевая промышленность*. 2022; (11): 62–66. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.015>
12. Неповинных Н.В., Петрова О.Н. Пищевые гидроколлоиды: классификация, функциональные свойства и применение. *Пищевые системы*. 2025; 8(1): 66–72. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72>
13. Рензяева Т.В., Тубольцева А.С., Понкратова Е.К., Луговая А.В., Казанцева А.В. Функционально-технологические свойства порошкообразного сырья и пищевых добавок в производстве кондитерских изделий. *Техника и технология пищевых производств*. 2014; (4): 43–49. EDN TGSKUL
14. Сагдеева Г.С., Айсина Р.И. Исследование влияния ксантановой камеди на показатели качества мучных кондитерских изделий. *Хлебопродукты*. 2021; (5): 51–53. EDN JXPDDI
15. Баженова А.Е., Пестерев М.А., Руденко О.С. Влияние влагоудерживающих добавок на микробиологические показатели пряников при хранении. *Пищевая промышленность*. 2024; (7): 36–39. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.7.7.006>
16. Liao Y.-C., Chang C.-C., Nagarajan D., Chen C.-Y., Chang J.-S. Algae-derived hydrocolloids in foods: applications and health-related issues. *Bioengineered*. 2021; 12(1): 3787–3801. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1946359>
17. Kirtil E., Aydogdu A., Oztop M.H. Investigation of physical properties and moisture sorption behaviour of different marshmallow formulations. *Acta Horticulturae*. 2017; 1152: 243–248. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2017.1152.33>
18. Калиновская Т.В., Омельчук В.И., Гаврилов А.В. Исследование влияния технологических факторов на изменение структурно-механических свойств затяжных аэрированных конфетных масс на основе сывороточных белков. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022; 84(2): 128–134. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-128-134>
19. Долматова И.А., Зайцева Т.Н., Кузнецова Е.А., Исаева К.С. Результаты исследований влияния температуры и плотности на стабильность зефира. *Аграрная наука*. 2023; (5): 98–102 (на англ. яз.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-370-5-98-102>
20. Delahaije R.J.B.M., Lech F.J., Wierenga P.A. Investigating the effect of temperature on the formation and stabilization of ovalbumin foams. *Food Hydrocolloids*. 2019; 91: 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.030>
21. Ivanova N.G., Nikitin I.A., Klokonos M.V., Berezina N.A., Bulavina T.A., Guseva D.A. Marshmallow technology of increased nutritional value. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 640: 052009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/5/052009>
8. Conte L., Milani A., Calligaris S., Rovellini P., Lucci P., Nicoli M.C. Temperature Dependence of Oxidation Kinetics of Extra Virgin Olive Oil (EVOO) and Shelf-Life Prediction. *Foods*. 2020; 9(3): 295. <https://doi.org/10.3390/foods9030295>
9. Choosuk N., Meesuk P., Renumarn P., Phungamngoen C., Jakkranuhwat N. Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. *Processes*. 2022; 10(7): 1392. <https://doi.org/10.3390/pr10071392>
10. Renumarn P., Choosuk N. Influence of Packaging and Storage Conditions on the Quality and Shelf-life of Chewy Santol (Kraton-Yee) Candies. *E3S Web of Conferences*. 2020; 141: 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014102002>
11. Kazantsev E.V., Kondratiev N.B., Osipov M.V., Petrova N.A., Lavrukhin M.A. Influence of packaging and temperature on the safety of foamy confectionery products structure. *Food Industry*. 2022; (11): 62–66 (in Russian). <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.015>
12. Nepovinnikh N.V., Petrova O.N. Food hydrocolloids: Classification, functional properties and applications. *Food systems*. 2025; 8(1): 66–72 (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72>
13. Renzyaeva T.V., Tuboltseva A.S., Ponkratova E.K., Lugovaya A.V., Kazantseva A.V. Functional and technological properties of powdered raw materials and food additives for confectionery. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2014; (4): 43–49 (in Russian). EDN TGSKUL
14. Sagdeeva G.S., Aysina R.I. Study of the influence of xanthan gum on the quality indicators of flour confectionery products. *Khleboprodukt*. 2021; (5): 51–53 (in Russian). EDN JXPDDI
15. Bazhenova A.E., Pesterev M.A., Rudenko O.S. The effect of moisture-retaining additives on the microbiological parameters of gingerbread during storage. *Food Industry*. 2024; (7): 36–39 (in Russian). <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.7.7.006>
16. Liao Y.-C., Chang C.-C., Nagarajan D., Chen C.-Y., Chang J.-S. Algae-derived hydrocolloids in foods: applications and health-related issues. *Bioengineered*. 2021; 12(1): 3787–3801. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1946359>
17. Kirtil E., Aydogdu A., Oztop M.H. Investigation of physical properties and moisture sorption behaviour of different marshmallow formulations. *Acta Horticulturae*. 2017; 1152: 243–248. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2017.1152.33>
18. Kalinovskaya T.V., Omelchuk V.I., Gavrilov A.V. Study of the influence of technological factors on the change in the structural and mechanical properties of protracted aerated candy masses based on whey proteins. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022; 84(2): 128–134 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-128-134>
19. Dolmatova I.A., Zaitseva T.N., Kuznetsova E.A., Isaeva K.S. The results of studies of the influence of temperature and density on the stability of marshmallow. *Agrarian science*. 2023; (5): 98–102. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-370-5-98-102>
20. Delahaije R.J.B.M., Lech F.J., Wierenga P.A. Investigating the effect of temperature on the formation and stabilization of ovalbumin foams. *Food Hydrocolloids*. 2019; 91: 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.030>
21. Ivanova N.G., Nikitin I.A., Klokonos M.V., Berezina N.A., Bulavina T.A., Guseva D.A. Marshmallow technology of increased nutritional value. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 640: 052009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/5/052009>

ОБ АВТОРАХ

Николай Борисович Кондратьев

доктор технических наук, главный научный сотрудник
conditerprom_lab@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3322-9621>

Егор Валерьевич Казанцев

научный сотрудник
conditerprom_lab@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8923-0029>

Максим Владимирович Осипов

кандидат технических наук, заведующий отделом
conditerprom_lab@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1316-259X>

Алла Евгеньевна Баженова

научный сотрудник
a.bazhenova@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6994-8524>

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. Электрозаводская, 20, Москва, 107023, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Nikolay Borisovich Kondratiev

Doctor of Technical Sciences, Chief Scientific Officer
n.kondratiev@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3322-9621>

Egor Valerievich Kazantsev

Research Associate
conditerprom_lab@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8923-0029>

Maxim Vladimirovich Osipov

Candidate of Technical Sciences, Head of Department
m.osipov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1316-259X>

Alla Evgenievna Bazhenova

Research Associate
a.bazhenova@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6994-8524>

All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry — Branch of Gorbатов Federal Research Center for Food Systems, 20 Elektroavodskaya St., Moscow, 107023, Russia

УДК 664.9.03

Научный обзор



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-135-148

Н.А. Горбунова**М.Б. Ребезов** ✉**М.И. Бабурина**

Федеральный научный центр
пищевых систем им. В.М. Горбатова
Российской академии наук, Москва,
Россия

✉ m.rebezov@fnscps.ru

Поступила в редакцию: 01.11.2025

Одобрена после рецензирования: 13.01.2026

Принята к публикации: 28.01.2026

© Горбунова Н.А., Ребезов М.Б.,
Бабурина М.И.

Роль факторов, влияющих на формирование вкуса и аромата мясных изделий (обзор, часть 1-я)

РЕЗЮМЕ

Первая часть научного обзора посвящена анализу молекулярных механизмов и ключевых химических соединений, определяющих формирование вкусоароматических характеристик мясных изделий при термической обработке. Основное внимание уделено биохимическим путям генерации летучих ароматических веществ, среди которых центральное место занимают реакция Майяра между редуцирующими сахарами и аминокетонами аминокислот (пептидов), а также окисление липидов, преимущественно фосфолипидов. Отмечена роль деградации по Штрекеру и термического разложения тиамина как источников специфических серосодержащих и гетероциклических соединений.

Проанализировано взаимодействие между продуктами реакции Майяра и окисления липидов, приводящее к образованию широкого спектра гетероциклических соединений (пиразинов, тиазолов, тиофенов, фуранов), детерминирующих видовой аромат мясных изделий. Установлена модулирующая роль фосфолипидов, которые не только служат основным источником летучих карбонильных соединений, но и выступают в качестве регулятора, оптимизирующего состав ароматического букета посредством контроля образования серосодержащих гетероциклов.

Рассмотрены нейрофизиологические основы сенсорного восприятия с акцентом на доминирующую роль ретроназального обоняния, интегрирующегося со вкусовыми и соматосенсорными сигналами в ЦНС человека. Сделан вывод, что органолептический профиль представляет собой результат синергетического взаимодействия сложной системы химических реакций между водорастворимыми прекурсорами и липидной фракцией, зависящего от биохимического состава сырья животного происхождения и параметров технологической обработки мяса.

Ключевые слова: реакция Майяра, деградация липидов, мясной аромат и вкус; химия вкуса, вкусовой фактор, анализ вкусовых качеств, летучие ароматические компоненты, мясные продукты

Для цитирования: Горбунова Н.А., Ребезов М.Б., Бабурина М.И. Роль факторов, влияющих на формирование вкуса и аромата мясных изделий (обзор, часть 1-я). *Аграрная наука*. 2026; 403(02): 135–148.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-135-148>

Review



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-135-148

Natalia A. Gorbunova**Maksim B. Rebezov** ✉**Marina I. Baburina**

Gorbatov Federal Research Center for
Food Systems, Moscow, Russia

✉ m.rebezov@fnscps.ru

Received by the editorial office: 01.11.2025

Accepted in revised: 13.01.2026

Accepted for publication: 28.01.2026

© Gorbunova N.A., Rebezov M.B.,
Baburina M.I.

The role of factors influencing the formation of taste and aroma of meat products (review, part 1)

ABSTRACT

The first part of the scientific review is devoted to the analysis of molecular mechanisms and key chemical compounds that determine the formation of flavor and aroma characteristics in meat products during thermal processing. Primary focus is placed on the biochemical pathways generating volatile aromatic substances, with central roles attributed to the Maillard reaction between reducing sugars and amino groups of amino acids/peptides, as well as lipid oxidation, primarily of phospholipids. The significance of Strecker degradation and thermal decomposition of thiamine as sources of specific sulfur-containing and heterocyclic compounds is highlighted.

The interaction between Maillard reaction products and lipid oxidation products is analyzed, demonstrating how it leads to the formation of a wide spectrum of heterocyclic compounds (pyrazines, thiazoles, thiophenes, furans) that determine the species-specific aroma of meat products. The modulating role of phospholipids is established; they not only serve as the main source of volatile carbonyl compounds but also act as regulators, optimizing the aromatic bouquet by controlling the formation of sulfur-containing heterocycles.

The neurophysiological basis of sensory perception is examined, emphasizing the dominant role of retronasal olfaction, which integrates with gustatory and somatosensory signals in the central nervous system. It is concluded that the organoleptic profile results from the synergistic interaction of a complex system of chemical reactions between water-soluble precursors and the lipid fraction, dependent on the biochemical composition of the animal raw material and meat processing parameters.

Key words: Maillard reaction, lipid degradation, meat aroma and flavor, taste chemistry, taste factor, taste analysis, volatile aroma components, meat products

For citation: Gorbunova N.A., Rebezov M.B., Baburina M.I. The Role of Factors Affecting the Formation of Taste and Aroma of Meat Products (review, part 1). *Agrarian science*. 2026; 403(02): 135–148 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-135-148>

Введение/Introduction

Важные потребительские характеристики пищевых продуктов, в том числе на основе мясных, — вкус и аромат. В связи с растущей потребностью в полноценных продуктах питания, сохраняя при этом вкусовые качества, пищевая промышленность ищет новые способы влияния на вкус продуктов питания. Исследования, направленные на понимание химического состава мясного аромата, а также на определение факторов, влияющих на вкусовые качества при производстве и переработке мяса, активно развиваются с учетом совершенствования технологий, использования различных вкусоароматических добавок, пожеланий потребителей [1].

Ароматические соединения вносят свой вклад в ароматический профиль мяса и заметно влияют на восприятие вкуса [2]. Сырое мясо почти не имеет аромата, а большинство ароматических соединений в мясе образуются в процессе нагревания. Вкусовые качества являются одной из важнейших качественных характеристик мясных продуктов, а также ключевым фактором, влияющим на общую приемлемость мясных продуктов. Аромат мясных продуктов формируется прекурсорами, претерпевающими ряд сложных реакций при тепловой обработке [3, 4]. Так, исследования показывают, что между вкусом говядины и ее приемлемостью для потребителей существует тесная взаимосвязь. Даже более выраженная, чем между сочностью или нежностью [1, 5].

Во время переработки, приготовления и хранения мяса происходит серия сложных термических реакций между нелетучими компонентами постной ткани и жировой, в результате которых образуется большое количество продуктов реакции. Хотя на вкус приготовленного мяса влияют соединения, влияющие на восприятие вкуса, именно летучие соединения, образующиеся в процессе приготовления, определяют ароматические свойства и в наибольшей степени придают мясу характерный вкус. Ключевыми факторами, влияющими на вкус мяса, являются продукты реакции Майяра, продукты окисления липидов и ряд аминокислот, пептидов и нуклеотидов [6]. Эти соединения взаимодействуют, создавая различные ароматы, вкусы и общие вкусовые характеристики, которые отличают различные виды мяса и определяют их приемлемость для потребителей [3, 4, 7].

Важной фракцией в синтезе летучих веществ является жировая ткань, которая претерпевает превращения, приводящие к образованию множества реакционноспособных веществ, таких как кислоты, спирты, альдегиды или кетоны [7].

Кровяной, металлический и соленый вкус со слегка сладковатым ароматом, как правило, является уникальной характеристикой свежего сырого мяса. Его аромат напоминает сыворотку крови. Однако во время приготовления во вкусе мяса происходят значительные изменения [8, 9].

Основными реакциями, участвующими в приготовлении, которые отвечают за развитие вкуса, являются реакция Майяра, термическое расщепление липидов и взаимодействие Майяра с липидами [10]. Вкус и аромат развиваются во время приготовления посредством сложных реакций между компонентами, содержащимися в сыром мясе, в сочетании с теплом. Вклад отдельных летучих соединений в формирование характерного вкуса различен. Лишь небольшая часть этого огромного числа летучих соединений, содержащихся в пищевых продуктах, способствует формированию вкуса [11].

Изучение литературы, анализирующей летучие соединения, содержащиеся в мясе, показывает, что были идентифицированы более 1000 летучих соединений, при этом в говядине их обнаружено больше, чем в других видах мяса [7]. Поэтому крайне важно отделять ароматоактивные соединения от других непахучих компонентов пищи [12].

Достоверная идентификация этих веществ, находящихся в сложной смеси с очень низким содержанием компонентов, осуществляется, как правило, методами масс-спектрометрического анализа [13, 14]. Так, в недавно выполненном A. Sohail *et al.* исследовании обобщены результаты исследований за последние 40 лет и проведена оценка 332 запаховых веществ, обнаруженных в термически приготовленном мясе с помощью GC-O [15].

Анализ ароматизирующих компонентов сырья и пищевых продуктов представляет собой сложную аналитическую задачу, поскольку возникает необходимость в достоверном определении близких по физико-химическим свойствам сотен химических веществ сложного органического строения, содержание которых может находиться на достаточно низком (порядка 0,001 мг/кг) уровне и даже быть ниже чувствительности применяемого метода. Такие вещества распределены по объему аналита и проявляют вкусоароматические свойства, как правило, синергетически, усиливая или ослабляя оттенки вкуса. Источниками их образования в продукции животного происхождения являются входящие в них и претерпевающие изменения при переработке и хранении белки, жиры и углеводы, а также привносимые компоненты специй, витаминов, ароматизаторов, реопротекторов и других ингредиентов [16].

Источниками значительного количества образующихся веществ могут выступать животные белки и их фракции, общее содержание которых в мясных продуктах составляет 10–21%, а также липиды, содержание которых может быть больше 2–55% [17, 18].

Данный обзор направлен на выявление, сопоставление и синтез результатов эмпирических исследований, посвященных анализу механизмов и химических соединений, формирующих и придающих аромат и вкус мясным продуктам, прошедшим термическую и альтернативную

нетермическую обработку с оценкой сенсорики восприятия запаха и вкуса человеком.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для достижения вышеуказанной цели были отобраны публикации, содержащие систематизированные данные, представленные в научных статьях, опубликованных на английском и русском языках с 1983 г. по ноябрь 2025-го в базах Google Scholar¹, Science Direct², eLibrary³ — Базе данных (РИНЦ), Scopus⁴, Sci-Hub⁵, PubMed⁶, направленные на анализ и обобщение существующей доказательной базы механизмов, участвующих в образовании ароматических соединений в мясе при

термической обработке, включая окисление липидов, реакцию Майяра и реакцию разложения Штеклера, взаимодействие липидов.

Отобранные статьи были тщательно проанализированы, чтобы оценить и систематизировать факторы, определяющие механизм, факторы и ключевые ароматические соединения, образующиеся в процессе нагревания при технологической обработке мясного сырья.

Процесс отбора научных публикаций, проведенный авторами с целью минимизации предвзятости, включал определение критериев и исключения данных (рис. 1).

Научный обзор был разбит на части и разделы, представленные в таблице 1.

Рис. 1. Определение критериев отбора опубликованных научных работ

Fig. 1. Definition of criteria for selection of published scientific publications



Таблица 1. Структура научного обзора «Роль факторов, влияющих на формирование вкуса и аромата мясных изделий»

Table 1. Structure of the scientific review “The Role of Factors Influencing the Formation of Taste and Aroma of Meat Products”

№ части обзора	Наименование раздела научного обзора	Примечание
1	1. Восприятие запаха и вкуса человеком	–
	2. Летучие вещества, образующиеся в результате реакции Майяра	
	3. Взаимодействие липидов и реакция Майяра при приготовлении мяса	
	4. Фосфолипиды и мясной аромат. Влияние фосфолипидов на летучие вещества в модельных реакционных системах Майяра	
2	5. Соединения, придающие аромат и вкус мясным продуктам, подвергнутым термической обработке	Часть 2-я будет опубликована в следующем номере журнала «Аграрная наука»
	6. Вкусоароматические вещества и восприятие солености	
	7. Влияние нетермических методов обработки на вкус и аромат мясных продуктов	
	8. Фактор животноводства при формировании вкуса мяса	

¹ URL: <https://scholar.google.com/>

² URL: <https://www.sciencedirect.com/>

³ URL: <https://elibrary.ru/>

⁴ URL: <https://www.elsevier.com/products/scopus>

⁵ URL: <https://sci-hub.ru/>

⁶ URL: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Часть 1

1. Восприятие запаха и вкуса человеком

Восприятие запаха — сложный сенсорный процесс, включающий в себя обнаружение летучих молекул обонятельными рецепторами в полости носа. Эти одоранты попадают в обонятельный эпителий двумя основными путями — ортоназальным (через ноздри во время обнюхивания) и ретроназальным (из полости рта во время приема пищи и глотания). Хотя оба пути стимулируют одни и те же рецепторы, мозг обрабатывает их по-разному. Ортоназальное обоняние играет ключевую роль в ожидании приема пищи и предотвращении опасности перед употреблением, в то время как ретроназальное обоняние непосредственно влияет на восприятие вкуса во время употребления [19].

Исследования с помощью нейровизуализации показали, что ретроназальное обоняние активирует области мозга, связанные со вкусом, такие как островковая кора и орбитофронтальная кора, подчеркивая их интеграцию с вкусовыми и соматосенсорными сигналами [20]. Геном человека содержит около 400 функциональных генов обонятельных рецепторов [21]. Каждый обонятельный рецептор способен связываться с определенным набором молекул одоранта, и, наоборот, отдельные одоранты могут стимулировать множество рецепторов. Этот сложный, перекрывающийся паттерн взаимодействий рецептор-лиганд в сочетании с генетическим разнообразием индивидуумов позволяет обонятельной системе человека распознавать от 10 тыс. до 1 трлн различных летучих соединений [22].

Значительная часть того, что мы обычно воспринимаем как вкус, по оценкам, составляет от 75 до 95%, на самом деле является результатом обоняния [23]. Запах играет важную роль в формировании памяти благодаря уникальным нервным путям, которые напрямую соединяют обонятельную систему с эмоциональными центрами мозга и центрами памяти, такими как миндалевидное тело и гиппокамп. Это объясняет, почему запахи часто вызывают яркие, эмоционально насыщенные воспоминания более эффективно, чем другие чувства. При приеме пищи такие ассоциации в обонятельной памяти существенно влияют на долгосрочные вкусовые предпочтения, особенно если они связаны с сильными эмоциональными или физиологическими переживаниями. Благодаря многократному воздействию и усвоенным ассоциациям запахи становятся неотъемлемой частью формирования индивидуальных вкусовых качеств и диетических привычек [24]. Хотя запах во многом определяет вкус, в первую очередь вкус отвечает за определение основных химических свойств, которые сигнализируют о питательности или потенциальной опасности.

Вкус — сенсорная функция, которая включает в себя распознавание химических веществ, связанных с пищей, с помощью рецепторных клеток, расположенных во вкусовых рецепторах [25, 26]. Вкусы возникают в результате сложного взаимодействия вкусовых ощущений, тактильных ощущений и ароматов, совместно воспринимаемых языком, носовыми пазухами и ротовой полостью [1].

Каждая вкусовая рецепторная клетка состоит из 50–150 специализированных эпителиальных клеток, включая рецепторные, опорные и базальные клетки, которые встроены в эпителий языка и открываются в ротовую полость через небольшую пору. Эта вкусовая пора служит местом, где переносимые слюной вкусовые вещества взаимодействуют с микроворсинками на рецепторных клетках, инициируя преобразование химических раздражителей в нервные сигналы [27].

Вкус в первую очередь выполняет две ключевые функции: оценивает пищевые продукты как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения питательной ценности и инициирует физиологические реакции, которые подготавливают организм к перевариванию [25, 28]. Знакомые продукты помогают организму предвидеть метаболические последствия, основываясь на предыдущем опыте, в то время как новые продукты задействуют процессы обучения, которые улучшают восприятие вкуса и диетическое поведение [25]. Это способствует получению удовольствия и стимулирует потребление в будущем как за счет внутреннего удовольствия, так и за счет обратной связи о питании [25, 28].

Вкусовые стимулы обычно высвобождаются во время жевания, когда пища растворяется в слюне и подвергается предварительному ферментативному перевариванию такими ферментами, как амилаза и липаза [29]. Эти процессы помогают высвободить химические вещества, придающие вкус, которые активируют специфические рецепторные клетки во вкусовых рецепторах. Люди, как и другие всеядные животные, распознают необходимые питательные вещества и потенциальные токсины с помощью пяти основных вкусовых ощущений: сладкого, соленого, кислого, умами и горького [28].

Сладость обычно ассоциируется с простыми углеводами; умами образуется из таких аминокислот, как глутамат и аспартат, а также некоторых рибонуклеотидов; соленый вкус придают натрий и другие катионные соли. Кислотность воспринимается как кислое, в то время как многие природные токсины и соединения растительного происхождения придают горький вкус, часто вызывая врожденную реакцию отвращения [28, 29].

2. Летучие вещества, образующиеся в результате реакции Майяра

Первичная реакция, участвующая в образовании ароматических соединений в мясе при термической обработке, включает окисление липидов, реакцию Майяра и реакцию разложения

Штекера, взаимодействие липидов, реакцию Майяра и деградацию тиамина [26, 30, 31]. Из-за внутримышечного введения липидов многие ароматические соединения могут быть идентифицированы в высоких концентрациях даже в сухой мышечной массе [32]. Некоторые линейные альдегиды, спирты, кетоны и кислотные соединения рассматриваются как побочные продукты окисления липидов.

Реакция Майяра — это комплекс сложных взаимодействий между редуцирующими сахарами и аминокислотами в процессе переработки и хранения пищевых продуктов, который является одним из наиболее важных путей получения разнообразных вкусовых и ароматических веществ в приготовленных пищевых продуктах, включая мясо. Эта реакция является сложной и приводит к образованию большого количества соединений, которые придают готовым пищевым продуктам улучшенный аромат, цвет, вкус и антиоксидантные свойства [7, 33].

Известно, что продуктами термического разложения аминокислот белков, входящих в состав всех пищевых продуктов, кроме CO_2 и NH_3 , являются органические соединения. Например, аланин может образовывать этиламин, 2-метил-5-этилпиридин, бутен-2; валин — изобутилен, диизобутиламин, ацетон; лейцин — 3-метилбутен-1, N-изобутилденизоамиламин, изомасляный альдегид и другие вещества [34].

Начальные стадии реакции были изучены довольно подробно и включают конденсацию карбонильной группы редуцирующего сахара с аминокислотой с образованием гликозиламина. Впоследствии происходят перегруппировка и обезвоживание, в результате чего дезоксиозоны, к различным продуктам дегидратации и разложения сахаров, таким как производные фурфурола и фуранона, гидроксикетоны и дикарбонильные соединения. Хотя эта реакция обсуждалась во многих исследовательских работах, интересно отметить, что механизм, предложенный Ходжем в 1953 году, всё ещё обеспечивает основу для нашего понимания ранних стадий этой реакции [35].

Последующие стадии реакции Майяра включают взаимодействие этих соединений с другими реакционноспособными компонентами, такими как амины, аминокислоты, альдегиды, сероводород и аммиак. Именно на этих стадиях образуются ароматические соединения, которые характеризуют приготовленные продукты и, следовательно, представляют особый интерес для химиков-ароматизаторов. Важной сопутствующей реакцией является расщепление аминокислот по Штрекеру дикарбонильными соединениями, образующимися в реакции Майяра.

Деградация по Штрекеру — это химическая реакция, происходящая при деградации аминокислот в присутствии дикарбонильных соединений, образующихся в ходе реакции Майяра. В результате образуются альдегиды, которые

играют ключевую роль в аромате приготовленного мяса [36]. Свободные аминокислоты, особенно серные, такие как цистеин и метионин, являются основными субстратами в реакциях Майяра и реакции деградации Штрекера [37].

Аминокислота декарбоксилируется и дезаминируется с образованием альдегида, в то время как дикарбонил превращается в аминокетон или аминокислоспирт. Если аминокислотой является цистеин, деградация Штрекера может привести к образованию сероводорода, аммиака и ацетальдегида. Эти соединения вместе с карбонильными соединениями, образующимися в результате реакции Майяра, являются богатым источником промежуточных продуктов для дальнейших реакций формирования вкуса. Это приводит к образованию многих важных классов ароматических соединений, включая фураны, пирразины, пирролы, оксазолы, тиофены, тиазолы и другие гетероциклические соединения. Соединения серы, полученные из рибозы и цистеина, по-видимому, особенно важны для придания мясу характерного аромата. В мясе основными источниками рибозы являются инозинмонофосфат и другие рибонуклеотиды [7, 33].

Взаимодействие сахаров с серными аминокислотами приводит к образованию многих ключевых летучих соединений с характерными мясными нотками вкуса [38].

В результате реакции Штрекера фенилаланин распадается до фенилацетальдегида, характеризующегося слегка сладковатым вкусом и медовым запахом, тогда как метионин распадается до метионаля с типичным запахом вареного картофеля [39].

Процессы гликогенолиза и гликолиза, происходящие в мясе, приводят к синтезу глюкозы и глюкозо-6-фосфата, тогда как распад АТФ приводит к образованию рибозы и рибозо-5-фосфата. Сахара образуют множество летучих соединений в реакциях с аминокислотами. Например, глюкоза образует пирразины с лизином [40], а рибоза образует множество ключевых серосодержащих соединений с цистеином, таких как 2-фуранметантиол, 3-меркапто-2-пентанон, 2-метил-3-фурантиол, 3-меркапто-2-бутанон, бис(2-метил-3-фурил) дисульфид, 2-ацетил-2-тиазолин, 1-меркапто-2-пропанон и 3-метил-3-тиофентиол [41, 42].

В процессе приготовления пищи в результате реакции Майяра могут образовываться сотни различных ароматических соединений в зависимости от химического состава продуктов, температуры, времени приготовления и наличия воздуха. Эти соединения в свою очередь часто распадаются, образуя еще большее количество ароматических соединений. Медленное приготовление при низкой температуре приводит к образованию преимущественно продуктов распада липидов, в то время как быстрое приготовление при высокой температуре — к образованию большего количества продуктов реакции Майяра [1, 43].

По оценкам Т. Hofmann *et al.*, только 3% из примерно 10 тыс. идентифицированных летучих соединений способны придавать запах пищевым продуктам [44].

На протяжении многих лет реакция Майяра используется для создания искусственных ароматизаторов, большинство патентов связаны с производством ароматизаторов, имитирующих вкус мяса [43]. Реакция Майяра в основном ответственна за производство гетероциклических соединений, таких как пиазин и фуран. Многочисленные реакции, возникающие в результате термического разложения и окисления липидов, приводят к образованию ароматических соединений из нелетучих водорастворимых прекурсоров и липидов [32].

Примечательно, что цвет, выход и типы образующихся вкусовых соединений определяются конкретными условиями, в которых протекает реакция Майяра, такими как температура, pH и влажность [45, 46].

Реакция Майяра не ограничивается простыми сахарами и аминокислотами и может включать пептиды. Пептиды с молекулярной массой от 1000 до 5000 усиливают вкусовые качества мяса посредством реакции Майяра [47]. Эти пептиды играют ключевую роль в формировании вкуса умами и вносят вклад в общую вкусовую привлекательность мяса [48].

3. Взаимодействие липидов и реакция Майяра при приготовлении мяса

Компонентный состав вкусоароматических веществ мясной продукции определен широким набором органических веществ, которые в общей совокупности формируют вкусовую гамму пищевой продукции. Важнейшими вкусоароматическими компонентами выступают природные липиды, содержащиеся во всех видах пищевой продукции в основном как соединения жирных кислот. Это свойство жиров связано с двумя основными компонентами — триглицеридами, локализованными в жировой ткани и межмышечных жировых клетках и являющимися растворителем для многих ароматических веществ, и фосфолипидами, расположенными в мембранах миофибрилл [49]. В процессе переработки мяса жиры подвергаются двум основным превращениям — липолизу и окислению. Интенсивность протекания этих изменений зависит от множества факторов, включая вид и продолжительность технологической обработки. Природные липиды являются неотъемлемой частью пищевых композиций и представляют собой смесь триглицеридов формулы:



где $R_{1,2,3}$ — остатки предельных, моно- и полиненасыщенных жирных кислот.

Липолиз из различных молекул липидов является независимым, в основном катализируемым кислотными липазами, нейтральными липазами и фосфолипазами, которые получают из эндогенной мышечной ткани и микроорганизмов. Эндогенные липазы включают липопроteinлипазу, чувствительную к гормону липазу, моноацилглицероллипазу и лизосомальную кислотную липазу [3, 50].

Наличие в продуктах питания жиров от 1 до более 50% приводит к формированию в ароматизирующей фракции пула химических веществ запахов значительного количества жирных кислот и их эфиров, которые во многом оказывают синергический эффект на органолептические характеристики. Значительную долю в такой композиции занимают эфиры пальмитиновой, стеариновой и олеиновой жирных кислот [51–53].

Насыщенные и ненасыщенные альдегиды, образующиеся в результате автоокисления липидов, вносят основной вклад в летучий состав приготовленного мяса. Реакции между карбонильными соединениями и амино- и тиольными группами являются важными этапами реакции Майяра как на начальных стадиях, так и при образовании ароматических соединений на более поздних стадиях. Таким образом, можно предположить, что альдегиды липидного происхождения могут участвовать в реакции Майяра во время приготовления мяса.

Среди летучих веществ, которые были обнаружены в мясе, есть ряд соединений, которые могут образовываться в результате взаимодействия липидов в реакции Майяра [15, 54]. Сообщалось о нескольких тиазолах с C&s n-алкильными заместителями во втором положении в ростбифе [55] и жареной курице [56]. Сообщалось о других алкилтиазолах с гораздо более длинными 2-алкильными заместителями (C1s–C15), которые содержатся в летучих веществах разогретой говядины и курятины [7], причем их наибольшие концентрации наблюдаются в говяжьей сердечной мышце.

Недавно более 50 алкил-3-тиазолинов и алкилтиазолов были выделены из вареной говядины, полученной от крупного рогатого скота, которого кормили рационами, содержащими добавки с рыбьим жиром [57]. Оказалось, что они легче образуются в мясе, приготовленном под давлением, чем в мясе, приготовленном на гриле. Хотя многие из тиазолов и 3-тиазолинов присутствовали в мясе крупного рогатого скота, получавшего обычную пищу, концентрация 3-тиазолинов в мясе крупного рогатого скота, получавшего добавки с рыбьим жиром, была значительно выше, чем в контрольных образцах.

В приготовленном мясе животных, которых кормили рыбьим жиром, содержались значительно более высокие концентрации насыщенных и ненасыщенных альдегидов, чем в мясе контрольной группы. По-видимому, алифатические альдегиды обеспечивают длинные n-алкильные группы

для этих соединений. Пути образования тиазола в разогретых пищевых продуктах с участием альдегидов, гидроксикетонов, аммиака и сероводорода уже обсуждались, и разумно предположить, что альдегиды, образующиеся в результате окисления липидов, могут участвовать в этих реакциях с образованием длинноцепочечных 2-алкилтиазолов. Алкилтиазолы, содержащие алкильные группы C₃–C₅, требуют альдегидов C₁₄–C₁₆, и наиболее вероятным источником их являются плазмалогены, которые содержат длинноцепочечные алкениловые эфирные заместители, которые гидролизуются с образованием жирных альдегидов [58].

Сердечная мышца содержит более высокие концентрации плазмалогенов, что объясняет более высокий уровень этих алкилтиазолов, содержащихся в разогретом говяжьем сердце. Сообщалось о наличии алкилпиридинов в бараньем жире для жарки [59], включая 2-пентилпиридин, который был обнаружен во всех других основных видах мяса. Реакция 2,4-декадиенала с аммиаком является вероятным путем образования 2-пентилпиридина.

Связанные реакции между диеналами и сероводородом могут быть ответственны за образование 2-алкилтиофенов с алкильными заместителями C₄–C₈ в говядине, приготовленной под давлением. Другие гетероциклические соединения с длинными n-алкильными заместителями, обнаруженные в мясе, включают бутил- и пентилпиразины. Было высказано предположение, что они могут образовываться в результате реакции пентанала или гексанала с дигидропиразином, образующимся при конденсации двух молекул аминокетона [7].

Пентанал и гексанал, по-видимому, участвуют в образовании 5-бутил-3-метил-1,2,4-третиолана и его 5-пентильного гомолога, которые, как сообщалось, содержатся в жареной курице [60] и свинине [61]. Третиоланы могут образовываться из альдегидов и сероводорода, и в качестве способа получения этих бутиловых и пентилтретиоланов было предложено взаимодействие сероводорода, ацетальдегида и пентанала или гексанала [62].

Об ароматических характеристиках сообщалось только для нескольких из этих алкилзамещенных гетероциклических соединений, но те, которые были исследованы, позволяют предположить, что они могут усиливать жирный и жареный аромат мяса [62]. Анализ запаха алкил-3-тиазолинов и алкилтиазолов, недавно обнаруженных в говядине, показывает, что они не обладают низкими пороговыми значениями запаха и, следовательно, могут не оказывать существенного влияния на запах [57]. Однако образование этих соединений обеспечивает конкурирующие реакции для промежуточных продуктов реакций формирования аромата, связанных с реакцией Майяра, и, таким образом, может модифицировать и контролировать образование желаемых ароматических соединений.

Реакция Майяра, протекающая между редуцирующими сахарами и аминокислотами во время приготовления, особенно важна для формирования характерных румяных оттенков в приготовленном мясе [63].

4. Фосфолипиды и мясной аромат. Влияние фосфолипидов на летучие вещества в модельных реакционных системах Майяра

Жиры и жирные кислоты играют важную роль в формировании специфического вкуса отдельных видов мяса [11]. Основная фракция липидов, ответственная за образование специфических летучих веществ, включает фосфолипиды [9] и в меньшей степени триацилглицерины [64]. Эта специфика обусловлена различиями в профилях жирных кислот у разных видов животных [11].

Фосфолипиды являются важными структурными компонентами всех клеток и содержат гораздо большее количество ненасыщенных жирных кислот, чем триглицериды, включая значительное количество полиненасыщенных жирных кислот, таких как арахидоновая кислота (20:4). Это делает их более восприимчивыми к окислению при нагревании, и они ассоциируются с неприятным вкусом, известным как «подогретый привкус», который появляется при повторном нагревании вареного мяса. Однако они могут образовывать продукты окисления липидов во время начальной варки мяса, которые придают мясу желаемый аромат.

При изучении вклада липидов в формирование аромата при нагревании мяса было показано, что фосфолипиды играют особенно важную роль. Когда из нежирных мышц перед приготовлением с использованием гексана удаляли триглицериды для внутримышечного введения, аромат после приготовления невозможно было отличить от запаха необработанного продукта в тестах сенсорного треугольника; оба продукта были оценены как мясистые. Но когда для экстракции всех липидов, фосфолипидов и триглицеридов использовали более полярный растворитель (хлороформ-метанол), произошло очень заметное изменение аромата: мясной аромат сменился ароматом жареного печени. Анализ летучих ароматических веществ из этих мясных полуфабрикатов показал, что контрольный продукт и продукт, экстрагированный гексаном, имеют сходные характеристики, в которых преобладают алифатические альдегиды и спирты. Однако удаление фосфолипидов, а также триглицеридов дало совершенно другой профиль: продукты окисления липидов были выведены, а количество алкилпиразинов значительно увеличилось. Это означает, что в обычном мясе фосфолипиды или продукты их распада ингибируют реакции, связанные с образованием гетероциклических ароматических соединений в результате реакции Майяра [7, 65].

Исследования влияния фосфолипидов на летучие продукты из нагретых водных растворов аминокислот и сахаров показали, что присутствие

фосфолипидов влияет на продукты реакции Майяра, подтверждая более ранние наблюдения в отношении обезжиренного мяса. Наиболее интересные результаты были получены при использовании систем, содержащих цистеин и рибозу, которые взаимодействовали в присутствии нескольких различных фосфолипидных препаратов, включая фосфатидилхолин из яичного желтка, фосфатидилэтаноламин из яичного желтка и фосфолипиды и триглицериды, выделенные из говядины. Реакционные системы давали сложные смеси летучих веществ, в которых преобладали серосодержащие гетероциклические соединения, в частности тиофены, тиенотиофены, дитиоланоны, дитианоны, тритиоланы и тритиановые кислоты, а также 2-метил-3-фурантиол, 2-фуранметанантиол и 2-метил-3-тиофентиол [7].

В присутствии липидов наблюдалось уменьшение количества многих из этих летучих веществ по сравнению с системой без липидов. Это подтвердило наблюдения, проведенные в мясе, о том, что фосфолипиды оказывают закалывающее действие на количество гетероциклических соединений, образующихся в реакции Майяра. В целом триглицериды говядины оказывали гораздо меньшее влияние на уровень летучих веществ Майяра, чем фосфолипидные препараты. Аромат реакционной смеси без каких-либо липидов был описан как сернистый и каучуковый, но с отчетливым мясным привкусом.

Добавление говяжьего триглицерида не повлияло на аромат, однако при использовании говяжьих фосфолипидов мясной аромат был более интенсивным, а сернистые нотки менее выраженными. Аналогичным образом добавление фосфатидилхолина или фосфатидилэтаноламина придало смесям повышенную мясистость. Однако в реакционных системах, содержащих фосфолипиды, концентрация мясоароматических соединений, таких как 2-метил-3-фурантиол, была ниже. Эту аномалию можно объяснить тем, что липиды играют роль регулятора вкуса. При высоких концентрациях производные фурантиола имеют сильный сернистый запах, и только при низких концентрациях становится заметен мясной аромат. Предполагается, что липиды ограничивают образование этих соединений серы и поддерживают их концентрацию в реакционной смеси на оптимальном уровне. Эта гипотеза о смягчении и контроле вкуса может объяснить особую роль фосфолипидов в аромате приготовленного мяса [7].

В реакционных смесях Майяра, содержащих фосфолипиды, образуется множество летучих веществ липидного происхождения, таких как углеводороды, алкилфураны, насыщенные и ненасыщенные спирты, альдегиды и кетоны. Реакционные смеси содержат соединения, полученные в результате взаимодействия альдегидов липидного происхождения с промежуточными продуктами реакции Майяра, наиболее распространенными

из которых были 2-пентилпиридин, 2-пентилтиофен, 2-гексилтиофен и 2-пентил-2%тиапиран [7]. Были обнаружены меньшие количества других 2-алкилтиофенов с n-алкильными заместителями между C₄ и C₈, а также 2-(1-гексенил) тиофена. Все эти гетероциклические соединения, по-видимому, образуются в результате реакции ненасыщенных альдегидов с сероводородом или аммиаком, полученных из цистеина. В системах Майяра, содержащих триглицериды, были обнаружены лишь следовые количества этих соединений. Это может быть объяснено гораздо более высокой долей полиненасыщенных жирных кислот в структурных фосфолипидах, чем в триглицеридах, используемых в модельных системах. Они гораздо легче подвергаются термическому окислению, чем ненасыщенные жирные кислоты [7].

Выявлены соединения, которые, по-видимому, являются производными холиновой части фосфатидилхолина, в летучих веществах, образующихся в результате реакции цистеина и рибозы в присутствии фосфатидилхолина. Три сульфида, 2-метил-3-(метилтио)фуран, 2- (или 3)-(метилтио)тиофен и 2-метил-3-(метилтио)тиофен были идентифицированы в системах, содержащих цистеин, рибозу и фосфолипид, но не были обнаружены в системах, не содержащих фосфолипидов. 2-метил-3-(метилтио)фуран является важным компонентом, влияющим на вкусовые качества мяса, и имеет очень низкое пороговое значение запаха [61].

Тиамин является важным витамином, естественным образом присутствующим в мясе. Термическая деградация тиамина приводит к образованию транзиторных и конечных летучих соединений, влияющих на формирование запаха в мясных продуктах, таких как тиазолы, тиофены и фураны. Образуются летучие вещества, характеризующиеся следующими вкусовыми нотками: мясными (2-метил-3-фурантиол, бис (2-метил-3-фурил)дисульфид, 3-тиофентиол, 2-фирмил-5-метилтиофен, 2-метил-3-(метилдитио)фуран), землистыми (4,5-диметилтиазол), жжеными (2-ацетилтиофен) и зелеными (2-метил-4,5-дигидро-3(2H)-тиофенон) [66].

Отмечено, что в свинине содержание тиамина колеблется от 0,8 до 1,1 мг / 100 г [67]. Анализ C. Thomas *et al.* подчеркивает ключевую роль тиамина для формирования аромата вареной ветчины [68].

Сообщалось, что соответствующий тиофен содержится в летучих веществах, образующихся в результате реакции тиамина с метионином. Он обладает мясным ароматом и низким пороговым значением. Как 2-, так и 3-(метилтио)тиофены были предварительно идентифицированы в вареном мясе и имитации мясных вкусов, хотя их ароматические свойства не были зарегистрированы. Предполагается, что образование этих сульфидов происходит на тех же начальных этапах, что и образование соответствующих тиолов.

Таблица 2. Формирование вкуса и аромата мясных изделий

Table 2. Formation of taste and aroma of meat products

Роль летучих соединений	Вкусоароматические характеристики термически обработанных мясных изделий формируются преимущественно комплексом летучих соединений, генерируемых в ходе термоиндуцированных химических превращений. Сырое мясо практически лишено выраженного аромата, который развивается в процессе нагревания		
Биохимические механизмы	Основными путями образования ароматических веществ являются:	Реакция Майяра	Между редуцирующими сахарами (рибозой, глюкозой) и аминокислотами (особенно серосодержащих — цистеина и метионина) и пептидов.
		Окисление липидов	В первую очередь полиненасыщенных жирных кислот в составе фосфолипидов с образованием реакционноспособных альдегидов, кетонов, спиртов и кислот.
		Взаимодействие продуктов реакции Майяра и окисления липидов	Приводящее к синтезу широкого спектра гетероциклических соединений.
		Дегградация тиамина (витамина В ₁)	Вносящая вклад в образование серосодержащих гетероциклов (тиазолов, тиофенов).
		Значение липидной фракции	Фосфолипиды, благодаря высокому содержанию полиненасыщенных жирных кислот, являются основным источником специфических летучих соединений липидного окисления, определяющих видовые различия аромата мяса. Одновременно фосфолипиды выступают в роли регулятора и модификатора реакций Майяра, ограничивая образование чрезмерного количества гетероциклических соединений (например, фурантиолов) и поддерживая их концентрацию в сенсорно-оптимальном диапазоне, смягчая резкие «сернистые» ноты и усиливая «мясной» букет. Триглицериды оказывают значительно меньшее влияние на формирование аромата по сравнению с фосфолипидами.
Сенсорная интеграция	Восприятие вкуса является мультимодальным процессом, в котором ретроназальное обоняние играет доминирующую роль (75–95% восприятия «вкуса»). Обонятельные сигналы интегрируются со вкусовыми и соматосенсорными ощущениями в ЦНС, формируя целостный органолептический образ. Обонятельные ассоциации тесно связаны с памятью и эмоциями, что существенно влияет на долгосрочные потребительские предпочтения мясных изделий.		
Сложность аналитических исследований	Идентификация и характеристика ключевых ароматических соединений представляет собой сложную аналитическую задачу из-за их чрезвычайно низких концентраций (на уровне мкг/кг), сложного химического состава и синергетического взаимодействия. Решение этой задачи требует применения высокочувствительных хромато-масс-спектрометрических методов в сочетании с ольфактометрией.		

Аналогичные механизмы, включающие замену кислорода в гетероциклическом кольце серой, объясняют образование 2-метил-3-фурантиола.3-тиофентиол [61].

Shu *et al.* [69] предположили, что 2- и 3-тиофентиолы могут образовываться при разложении цистеина путем конденсации двух молекул меркаптоацетальдегида с последующей реакцией с сероводородом и последующей дегидратацией и выделением сероводорода. Образование метилсульфидов требует присутствия реакционноспособной метилтиогруппы (например, метантиола), которая могла бы участвовать в более поздних стадиях этих реакций вместо сероводорода. Было высказано предположение, что в реакционных системах, содержащих цистеин, рибозу и фосфатидилхолин, метантиол образуется в результате взаимодействия фрагмента холина с сероводородом.

Выводы/Conclusions

Понимание вкуса мяса крайне важно для улучшения его качества, и его анализ должен проводиться на основе комплексных химических исследований для выявления различных факторов, влияющих на состав, формирование и развитие аромата мяса. Был выявлен пласт научных данных, дающих понимание и особенности формирования вкуса мяса и мясopодуктов.

Реакция Майяра играет важную роль в формировании вкуса мяса, опосредованного летучими и нелетучими предшественниками. Условия и методы приготовления мяса имеют решающее значение для формирования вкуса, поскольку в результате термических реакций образуется множество летучих веществ, которые способствуют формированию вкуса.

На основе проведенного анализа научных публикаций, возможно сформулировать следующие выводы, представленные в таблице 2.

Таким образом, формирование характерного вкуса и аромата мясных продуктов представляет собой результат сложной сети конкурирующих и взаимодополняющих химических реакций между водорастворимыми прекурсорами (аминокислоты, пептиды, сахара, нуклеотиды) и липидной фракцией, преимущественно фосфолипидами. Профиль образующихся летучих соединений и, как следствие, сенсорные характеристики конечного мясного продукта критически зависят от биохимического состава сырья животного происхождения, параметров технологической обработки (температуры, времени, pH) и их взаимодействия.

Во второй части обзора будут представлены другие факторы, влияющие на вкус мяса и мясopодуктов. Часть 2-я научного обзора будет опубликована в следующем номере журнала «Аграрная наука».

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kerth C.R., Miller R.K. Beef flavor: a review from chemistry to consumer. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015; 95(14): 2783–2798.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7204>
2. Legako J.F. *et al.* Consumer palatability scores and volatile beef flavor compounds of five USDA quality grades and four muscles. *Meat Science*. 2015; 100: 291–300.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.10.026>
3. Fu Y., Cao S., Yang L., Li Z. Flavor formation based on lipid in meat and meat products: A review. *Journal Food Biochemistry*. 2022; 46(12): e14439.
<https://doi.org/10.1111/jfbc.14439>
4. Park M.K., Choi Y.-S. Effective Strategies for Understanding Meat Flavor: A Review. *Food Science of Animal Resources*. 2025; 45(1): 165–184.
<https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e124>
5. Behrends J.M. *et al.* Beef customer satisfaction: USDA quality grade and marination effects on consumer evaluations of top round steaks. *Journal of Animal Science*. 2005; 83(3): 662–670.
<https://doi.org/10.2527/2005.833662x>
6. Sun A. *et al.* Maillard reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: A review. *Food Research International*. 2022; 151: 110823.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110823>
7. Mottram D.S. Flavour formation in meat and meat products: a review. *Food Chemistry*. 1998; 62(4): 415–424.
[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00076-4)
8. Jayasena D.D., Ahn D.U., Nam K.C., Jo C. Flavour Chemistry of Chicken Meat: A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2013; 26(5): 732–742.
<http://doi.org/10.5713/ajas.2012.12619>
9. Soncin S., Chiesa L.M., Cantoni C., Biondi P.A. Preliminary study of the volatile fraction in the raw meat of pork, duck and goose. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2007; 20(5): 436–439.
<http://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.09.001>
10. Brunton N.P., Cronin D.A., Monahan F.J. Volatile components associated with freshly cooked and oxidized off-flavours in turkey breast meat. *Flavour and Fragrance Journal*. 2002; 17(5): 327–334.
<https://doi.org/10.1002/ffj.1087>
11. Kosowska M., Majcher M.A., Fortuna T. Volatile compounds in meat and meat products. *Journal of Food Science and Technology*. 2017; 37(1): 1–7.
<https://doi.org/10.1590/1678-457X.08416>
12. Grosch W. Detection of potent odorants in foods by aroma extract dilution analysis. *Trends in Food Science & Technology*. 1993; 4(3): 68–73.
[http://doi.org/10.1016/0924-2244\(93\)90187-F](http://doi.org/10.1016/0924-2244(93)90187-F)
13. Амелин В.Г., Андоралов А.М. Высокоэффективная жидкостная хроматография — времяпролетная масс-спектрометрия в идентификации и определении 111 пестицидов в пищевых продуктах, кормах, воде и почве. *Журнал аналитической химии*. 2016; 71(1): 85–96.
<https://doi.org/10.7868/S0044450215120038>
14. Кучменко Т.А., Кочетова Ж.Ю., Федорова Е.В., Бондарева Л.П., Шлык Ю.К., Коренман Я.И. Применение матрицы пьезосорбционных датчиков для анализа газовых этанолсодержащих смесей. *Журнал прикладной химии*. 2003; 76(5): 764–770.
EDN PAYQNL
15. Sohail A. *et al.* Aroma compounds identified in cooked meat: A review. *Food Research International*. 2022; 157: 111385.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111385>
16. Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Монография. Saarbrücken, Germany: *Lambert Academic Publishing*. 2012; 232.
ISBN 978-3-8465-1027-8
EDN UNVMD5

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. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. Kerth C.R., Miller R.K. Beef flavor: a review from chemistry to consumer. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015; 95(14): 2783–2798.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7204>
2. Legako J.F. *et al.* Consumer palatability scores and volatile beef flavor compounds of five USDA quality grades and four muscles. *Meat Science*. 2015; 100: 291–300.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.10.026>
3. Fu Y., Cao S., Yang L., Li Z. Flavor formation based on lipid in meat and meat products: A review. *Journal Food Biochemistry*. 2022; 46(12): e14439.
<https://doi.org/10.1111/jfbc.14439>
4. Park M.K., Choi Y.-S. Effective Strategies for Understanding Meat Flavor: A Review. *Food Science of Animal Resources*. 2025; 45(1): 165–184.
<https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e124>
5. Behrends J.M. *et al.* Beef customer satisfaction: USDA quality grade and marination effects on consumer evaluations of top round steaks. *Journal of Animal Science*. 2005; 83(3): 662–670.
<https://doi.org/10.2527/2005.833662x>
6. Sun A. *et al.* Maillard reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: A review. *Food Research International*. 2022; 151: 110823.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110823>
7. Mottram D.S. Flavour formation in meat and meat products: a review. *Food Chemistry*. 1998; 62(4): 415–424.
[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00076-4)
8. Jayasena D.D., Ahn D.U., Nam K.C., Jo C. Flavour Chemistry of Chicken Meat: A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2013; 26(5): 732–742.
<http://doi.org/10.5713/ajas.2012.12619>
9. Soncin S., Chiesa L.M., Cantoni C., Biondi P.A. Preliminary study of the volatile fraction in the raw meat of pork, duck and goose. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2007; 20(5): 436–439.
<http://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.09.001>
10. Brunton N.P., Cronin D.A., Monahan F.J. Volatile components associated with freshly cooked and oxidized off-flavours in turkey breast meat. *Flavour and Fragrance Journal*. 2002; 17(5): 327–334.
<https://doi.org/10.1002/ffj.1087>
11. Kosowska M., Majcher M.A., Fortuna T. Volatile compounds in meat and meat products. *Journal of Food Science and Technology*. 2017; 37(1): 1–7.
<https://doi.org/10.1590/1678-457X.08416>
12. Grosch W. Detection of potent odorants in foods by aroma extract dilution analysis. *Trends in Food Science & Technology*. 1993; 4(3): 68–73.
[http://doi.org/10.1016/0924-2244\(93\)90187-F](http://doi.org/10.1016/0924-2244(93)90187-F)
13. Amelin V.G., Andoralov A.M. High-performance liquid chromatography — time-of-flight mass spectrometry in the identification and determination of 111 pesticides in food, feed, water, and soil. *Journal of Analytical Chemistry*. 2016; 71(1): 82–93.
<https://doi.org/10.1134/S1061934815120035>
14. Kuchmenko T.A., Kochetova Zh.Yu., Fedorova E.V., Bondareva L.P., Shlyk Yu.K., Korenman Ya.I. Application of a Matrix of Piezosorption Sensors to Analysis of Ethanol-Containing Gas Mixtures. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2003; 76(5): 736–741.
<https://doi.org/10.1023/A:1026057102983>
15. Sohail A. *et al.* Aroma compounds identified in cooked meat: A review. *Food Research International*. 2022; 157: 111385.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111385>
16. Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. Nanosensory analysis of meat raw materials and plant objects. Monograph. Saarbrücken, Germany: *Lambert Academic Publishing*. 2012; 232 (in Russian).
ISBN 978-3-8465-1027-8
EDN UNVMD5

17. Vostrikova N.L., Chernukha I.M., Kulikovskiy A.V., Shishkin S.S. Study and identification of main proteins and peptides to determine the content of muscle protein in structureless cooked products by the method of two-dimensional electrophoresis followed by the time-of-flight mass spectrometry identification. *Foods and Raw Materials*. 2016; 4(2): 136–147.
<https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-136-147>
18. Baburina M.I., Vostrikova N.L., Kulikovskii A.V., Zarubina A.N., Ivankin A.N. Defragmenting Processing of Collagen-Containing Wastes of Meat Processing Industry into Functional Feed Additives for Obtaining High-Quality Food. *World Journal of Food Science and Technology*. 2017; 1(2): 39–46.
EDN QACOIR
19. Blankenship M.L., Grigorova M., Katz D.B., Maier J.X. Retronasal Odor Perception Requires Taste Cortex, but Orthonasal Does Not. *Current Biology*. 2019; 29(1): 62–69.e3.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.11.011>
20. Small D.M., Voss J., Mak Y.E., Simmons K.B., Parrish T., Gitelman D. Experience-Dependent Neural Integration of Taste and Smell in the Human Brain. *Journal of Neurophysiology*. 2004; 92(3): 1892–1903.
<https://doi.org/10.1152/jn.00050.2004>
21. Wu C., Xu M., Dong J., Cui W., Yuan S. The structure and function of olfactory receptors. *Trends in Pharmacological Sciences*. 2024; 45(3): 268–280.
<https://doi.org/10.1016/j.tips.2024.01.004>
22. Gu Y. *et al.* A systematic review of the structure and function of human olfactory receptors and key technologies involved. *Trends in Food Science & Technology*. 2025; 159: 104971.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104971>
23. Spence C. Just how much of what we taste derives from the sense of smell?. *Flavour*. 2015; 4: 30.
<https://doi.org/10.1186/s13411-015-0040-2>
24. Hackländer R.P.M., Janssen S.M.J., Bermeitinger C. An in-depth review of the methods, findings, and theories associated with odor-evoked autobiographical memory. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2019; 26(2): 401–429.
<https://doi.org/10.3758/s13423-018-1545-3>
25. Breslin P.A.S. An Evolutionary Perspective on Food and Human Taste. *Current Biology*. 2013; 23(9): R409–R418.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.010>
26. Khan M.I., Jo C., Tariq M.R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors — A systematic review. *Meat Science*. 2015; 110: 278–284.
<http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.08.002>
27. Chandrashekar J., Hoon M.A., Ryba N.J.P., Zuker C.S. The receptors and cells for mammalian taste. *Nature*. 2006; 444(7117): 288–294.
<http://doi.org/10.1038/nature05401>
28. Rolls E.T. Taste, olfactory, and food reward value processing in the brain. *Progress in Neurobiology*. 2015; 127–128: 64–90.
<https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2015.03.002>
29. Martin L.E., Gutierrez V.A., Torregrossa A.-M. The role of saliva in taste and food intake. *Physiology & Behavior*. 2023; 262: 114109.
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114109>
30. Wang Y.-R., Luo R.-M., Wang S.-L. Water distribution and key aroma compounds in the process of beef roasting. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 978622.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.978622>
31. Afzal A. *et al.* The chemistry of flavor formation in meat and meat products in response to different thermal and non-thermal processing techniques: An overview. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022; 46: e16847.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.16847>
32. Gardner K., Legako J.F. Volatile flavor compounds vary by beef product type and degree of doneness. *Journal of Animal Science*. 2018; 96(10): 4238–4250.
<https://doi.org/10.1093/jas/sky287>
33. Liu X., Xia B., Hu L.-T., Ni Z.-J., Thakur K., Wei Z.-J. Maillard conjugates and their potential in food and nutritional industries: A review. *Food Frontiers*. 2020; 1(4): 382–397.
<https://doi.org/10.1002/fft2.43>
17. Vostrikova N.L., Chernukha I.M., Kulikovskiy A.V., Shishkin S.S. Study and identification of main proteins and peptides to determine the content of muscle protein in structureless cooked products by the method of two-dimensional electrophoresis followed by the time-of-flight mass spectrometry identification. *Foods and Raw Materials*. 2016; 4(2): 136–147.
<https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-136-147>
18. Baburina M.I., Vostrikova N.L., Kulikovskii A.V., Zarubina A.N., Ivankin A.N. Defragmenting Processing of Collagen-Containing Wastes of Meat Processing Industry into Functional Feed Additives for Obtaining High-Quality Food. *World Journal of Food Science and Technology*. 2017; 1(2): 39–46.
EDN QACOIR
19. Blankenship M.L., Grigorova M., Katz D.B., Maier J.X. Retronasal Odor Perception Requires Taste Cortex, but Orthonasal Does Not. *Current Biology*. 2019; 29(1): 62–69.e3.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.11.011>
20. Small D.M., Voss J., Mak Y.E., Simmons K.B., Parrish T., Gitelman D. Experience-Dependent Neural Integration of Taste and Smell in the Human Brain. *Journal of Neurophysiology*. 2004; 92(3): 1892–1903.
<https://doi.org/10.1152/jn.00050.2004>
21. Wu C., Xu M., Dong J., Cui W., Yuan S. The structure and function of olfactory receptors. *Trends in Pharmacological Sciences*. 2024; 45(3): 268–280.
<https://doi.org/10.1016/j.tips.2024.01.004>
22. Gu Y. *et al.* A systematic review of the structure and function of human olfactory receptors and key technologies involved. *Trends in Food Science & Technology*. 2025; 159: 104971.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104971>
23. Spence C. Just how much of what we taste derives from the sense of smell?. *Flavour*. 2015; 4: 30.
<https://doi.org/10.1186/s13411-015-0040-2>
24. Hackländer R.P.M., Janssen S.M.J., Bermeitinger C. An in-depth review of the methods, findings, and theories associated with odor-evoked autobiographical memory. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2019; 26(2): 401–429.
<https://doi.org/10.3758/s13423-018-1545-3>
25. Breslin P.A.S. An Evolutionary Perspective on Food and Human Taste. *Current Biology*. 2013; 23(9): R409–R418.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.010>
26. Khan M.I., Jo C., Tariq M.R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors — A systematic review. *Meat Science*. 2015; 110: 278–284.
<http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.08.002>
27. Chandrashekar J., Hoon M.A., Ryba N.J.P., Zuker C.S. The receptors and cells for mammalian taste. *Nature*. 2006; 444(7117): 288–294.
<http://doi.org/10.1038/nature05401>
28. Rolls E.T. Taste, olfactory, and food reward value processing in the brain. *Progress in Neurobiology*. 2015; 127–128: 64–90.
<https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2015.03.002>
29. Martin L.E., Gutierrez V.A., Torregrossa A.-M. The role of saliva in taste and food intake. *Physiology & Behavior*. 2023; 262: 114109.
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114109>
30. Wang Y.-R., Luo R.-M., Wang S.-L. Water distribution and key aroma compounds in the process of beef roasting. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 978622.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.978622>
31. Afzal A. *et al.* The chemistry of flavor formation in meat and meat products in response to different thermal and non-thermal processing techniques: An overview. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022; 46: e16847.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.16847>
32. Gardner K., Legako J.F. Volatile flavor compounds vary by beef product type and degree of doneness. *Journal of Animal Science*. 2018; 96(10): 4238–4250.
<https://doi.org/10.1093/jas/sky287>
33. Liu X., Xia B., Hu L.-T., Ni Z.-J., Thakur K., Wei Z.-J. Maillard conjugates and their potential in food and nutritional industries: A review. *Food Frontiers*. 2020; 1(4): 382–397.
<https://doi.org/10.1002/fft2.43>

34. Неклюдов А.Д., Иванкин А.Н. Биохимическая переработка жиров и масел в новые липидные продукты с улучшенными биологическими и физико-химическими свойствами. Обзор. *Прикладная биохимия и микробиология*. 2002; 38(5): 469–481. EDN MPRKOWB
35. Ledl F., Schleicher E. New Aspects of the Maillard Reaction in Foods and in the Human Body. *Angewandte Chemie International Edition*. 1990; 29(6): 565–594. <https://doi.org/10.1002/anie.199005653>
36. Chen L., Liu R., Wu M., Ge Q., Yu H. A review on aroma-active compounds derived from branched-chain amino acid in fermented meat products: Flavor contribution, formation pathways, and enhancement strategies. *Trends in Food Science & Technology*. 2024; 145: 104371. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104371>
37. Majcher M., Jeleń H.H. Effect of Cysteine and Cystine Addition on Sensory Profile and Potent Odorants of Extruded Potato Snacks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007; 55(14): 5754–5760. <http://doi.org/10.1021/jf0703147>
38. Elmore J.S., Campo M.M., Enser M., Mottram D.S. Effect of Lipid Composition on Meat-like Model Systems Containing Cysteine, Ribose, and Polyunsaturated Fatty Acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002; 50(5): 1126–1132. <http://doi.org/10.1021/jf0108718>
39. Granvogl M., Beksan E., Schieberle P. New Insights into the Formation of Aroma-Active Strecker Aldehydes from 3-Oxazolines as Transient Intermediates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012; 60(25): 6312–6322. <http://doi.org/10.1021/jf301489j>
40. Ames J.M., Guy R.C.E., Kipping G.J. Effect of pH and Temperature on the Formation of Volatile Compounds in Cysteine/Reducing Sugar/Starch Mixtures during Extrusion Cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001; 49(4): 1885–1894. <http://doi.org/10.1021/jf0012547>
41. Cerny C., Davidek T. Formation of Aroma Compounds from Ribose and Cysteine during the Maillard Reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003; 51(9): 2714–2721. <http://doi.org/10.1021/jf026123f>
42. Hofmann T., Schieberle P. Evaluation of the Key Odorants in a Thermally Treated Solution of Ribose and Cysteine by Aroma Extract Dilution Techniques. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1995; 43(8): 2187–2194. <http://doi.org/10.1021/jf00056a042>
43. Danehy J.P. Maillard Reactions: Nonenzymatic Browning in Food Systems with Special Reference to the Development of Flavor. *Advances in Food Research*. 1986; 30: 77–138. [https://doi.org/10.1016/s0065-2628\(08\)60348-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2628(08)60348-1)
44. Dunkel A. *et al.* Nature's Chemical Signatures in Human Olfaction: A Foodborne Perspective for Future Biotechnology. *Angewandte Chemie International Edition*. 2014; 53(28): 7124–7143. <http://doi.org/10.1002/anie.201309508>
45. Ribeiro F.A. *et al.* Effects of relative humidity on dry-aged beef quality. *Meat Science*. 2024; 213: 109498. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109498>
46. Wei C.-K., Ni Z.-J., Thakur K., Liao A.-M., Huang J.-H., Wei Z.-J. Color and flavor of flaxseed protein hydrolysates Maillard reaction products: Effect of cysteine, initial pH, and thermal treatment. *International Journal of Food Properties*. 2019; 22(1): 84–99. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1573830>
47. Fu Y., Zhang Y., Soladoye O.P., Aluko R.E. Maillard reaction products derived from food protein-derived peptides: insights into flavor and bioactivity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020; 60(20): 3429–3442. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1691500>
48. Kang L., Alim A., Song H. Identification and characterization of flavor precursor peptide from beef enzymatic hydrolysate by Maillard reaction. *Journal of Chromatography B*. 2019; 1104: 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.10.025>
49. Лисицын А.Б., Туниева Е.К., Горбунова Н.А. Окисление липидов: механизм, динамика, ингибирование. *Всё о мясе*. 2015; (1): 10–15. EDN TJZEYN
34. Neklyudov A.D., Ivankin A.N. Biochemical Processing of Fats and Oils As a Means of Obtaining Lipid Products with Improved Biological and Physicochemical Properties. A Review. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2002; 38(5): 399–409. <https://doi.org/10.1023/A:1019948830882>
35. Ledl F., Schleicher E. New Aspects of the Maillard Reaction in Foods and in the Human Body. *Angewandte Chemie International Edition*. 1990; 29(6): 565–594. <https://doi.org/10.1002/anie.199005653>
36. Chen L., Liu R., Wu M., Ge Q., Yu H. A review on aroma-active compounds derived from branched-chain amino acid in fermented meat products: Flavor contribution, formation pathways, and enhancement strategies. *Trends in Food Science & Technology*. 2024; 145: 104371. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104371>
37. Majcher M., Jeleń H.H. Effect of Cysteine and Cystine Addition on Sensory Profile and Potent Odorants of Extruded Potato Snacks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007; 55(14): 5754–5760. <http://doi.org/10.1021/jf0703147>
38. Elmore J.S., Campo M.M., Enser M., Mottram D.S. Effect of Lipid Composition on Meat-like Model Systems Containing Cysteine, Ribose, and Polyunsaturated Fatty Acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002; 50(5): 1126–1132. <http://doi.org/10.1021/jf0108718>
39. Granvogl M., Beksan E., Schieberle P. New Insights into the Formation of Aroma-Active Strecker Aldehydes from 3-Oxazolines as Transient Intermediates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012; 60(25): 6312–6322. <http://doi.org/10.1021/jf301489j>
40. Ames J.M., Guy R.C.E., Kipping G.J. Effect of pH and Temperature on the Formation of Volatile Compounds in Cysteine/Reducing Sugar/Starch Mixtures during Extrusion Cooking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001; 49(4): 1885–1894. <http://doi.org/10.1021/jf0012547>
41. Cerny C., Davidek T. Formation of Aroma Compounds from Ribose and Cysteine during the Maillard Reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003; 51(9): 2714–2721. <http://doi.org/10.1021/jf026123f>
42. Hofmann T., Schieberle P. Evaluation of the Key Odorants in a Thermally Treated Solution of Ribose and Cysteine by Aroma Extract Dilution Techniques. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1995; 43(8): 2187–2194. <http://doi.org/10.1021/jf00056a042>
43. Danehy J.P. Maillard Reactions: Nonenzymatic Browning in Food Systems with Special Reference to the Development of Flavor. *Advances in Food Research*. 1986; 30: 77–138. [https://doi.org/10.1016/s0065-2628\(08\)60348-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2628(08)60348-1)
44. Dunkel A. *et al.* Nature's Chemical Signatures in Human Olfaction: A Foodborne Perspective for Future Biotechnology. *Angewandte Chemie International Edition*. 2014; 53(28): 7124–7143. <http://doi.org/10.1002/anie.201309508>
45. Ribeiro F.A. *et al.* Effects of relative humidity on dry-aged beef quality. *Meat Science*. 2024; 213: 109498. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109498>
46. Wei C.-K., Ni Z.-J., Thakur K., Liao A.-M., Huang J.-H., Wei Z.-J. Color and flavor of flaxseed protein hydrolysates Maillard reaction products: Effect of cysteine, initial pH, and thermal treatment. *International Journal of Food Properties*. 2019; 22(1): 84–99. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1573830>
47. Fu Y., Zhang Y., Soladoye O.P., Aluko R.E. Maillard reaction products derived from food protein-derived peptides: insights into flavor and bioactivity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020; 60(20): 3429–3442. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1691500>
48. Kang L., Alim A., Song H. Identification and characterization of flavor precursor peptide from beef enzymatic hydrolysate by Maillard reaction. *Journal of Chromatography B*. 2019; 1104: 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.10.025>
49. Lisitsyn A.B., Tuniyeva E.K., Gorbunova N.A. Oxidation of lipids: the mechanism, dynamics, inhibition (on materials of foreign literature). *Vsyo o Myase*. 2015; (1): 10–15 (in Russian). EDN TJZEYN

50. Shahidi F., Hossain A. Role of Lipids in Food Flavor Generation. *Molecules*. 2022; 27(15): 5014. <https://doi.org/10.3390/molecules27155014>
51. Mateo J., Zumalacárregui J.M. Volatile compounds in chorizo and their changes during ripening. *Meat Science*. 1996; 44(4): 255–273. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(96\)00028-9](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(96)00028-9)
52. Иванкин А.Н. Жиры в составе современных мясных продуктов. *Мясная индустрия*. 2007; (6): 8–15. EDN IAJQDN
53. Casaburi A. *et al.* Biochemical and sensory characteristics of traditional fermented sausages of Vallo di Diano (Southern Italy) as affected by the use of starter cultures. *Meat Science*. 2007; 76(2): 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.11.011>
54. Whitfield F.B., Mottram D.S. Volatiles from interactions of Maillard reactions and lipids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1992; 31(1–2): 1–58. <https://doi.org/10.1080/10408399209527560>
55. Hartman G.J., Jin Q.Z., Collins G.J., Lee K.N., Ho C.T., Chang S.S. Nitrogen-containing heterocyclic compounds identified in the volatile flavor constituents of roast beef. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1983; 31(5): 1030–1033. <https://doi.org/10.1021/jf00119a027>
56. Tang J., Jin Q.Z., Shen G.H., Ho C.T., Chang S.S. Isolation and identification of volatile compounds from fried chicken. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1983; 31(6): 1287–1292. <https://doi.org/10.1021/jf00120a035>
57. Elmore J.S., Mottram D.S., Enser M.B., Wood J.D. Novel Thiazoles and 3-Thiazolines in Cooked Beef Aroma. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1997; 45(9): 3603–3607. <https://doi.org/10.1021/jf970066m>
58. Fogerty A.C., Whitfield F.B., Svoronos D., Ford G.L. The composition of the fatty acids and aldehydes of the ethanolamine and choline phospholipids of various meats. *International Journal of Food Science & Technology*. 1991; 26(4): 363–371. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb01978.x>
59. Buttery R.G., Haddon W.F., Seifert R.M., Turnbaugh, J.G. Thiamin odor and bis(2-methyl-3-furyl) disulfide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1984; 32(3): 674–676. <https://doi.org/10.1021/jf00123a061>
60. Hwang S.S., Carlin J.T., Bao Y., Hartman G.J., Ho C.T. Characterization of volatile compounds generated from the reactions of aldehydes with ammonium sulfide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1986; 34(3): 538–542. <https://doi.org/10.1021/jf00069a042>
61. Werkhoff P., Brtning J., Emberger R., Gtinter, M., Hopp R. Flavor chemistry of meat volatiles: New results on flavor components from beef, pork and chicken. Hopp R., Mori K. (eds.). *Recent Developments in Flavor and Fragrance Chemistry. Proceedings of the 3rd International Haarmann & Reimer Symposium*. Weinheim: VCH. 1993; 183–213.
62. Buttery R.G., Ling L.C., Teranishi R., Mon T.R. Roasted lamb fat: basic volatile components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1977; 25(6): 1227–1229. <https://doi.org/10.1021/jf60214a038>
63. Li L., Belloch C., Flores M. The Maillard Reaction as Source of Meat Flavor Compounds in Dry Cured Meat Model Systems under Mild Temperature Conditions. *Molecules*. 2021; 26(1): 223. <https://doi.org/10.3390/molecules26010223>
64. Meinert L., Andersen L.T., Bredie W.L.P., Bjerregaard C., Aaslyng M.D. Chemical and sensory characterization of pan-fried pork flavor: Interaction between raw meat quality, ageing and frying temperature. *Meat Science*. 2007; 75(2): 229–242. <http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.07.004>
65. Ren Y. *et al.* Effect of alterations in phospholipids and free fatty acids on aroma-active compounds in instant-boiled chuck tender, sirloin and silverside beef. *Heliyon*. 2024; 10(16): e36382. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36382>
66. Ba H.V., Hwang I., Jeong D., Touseef A. Principle of Meat Aroma Flavors and Future Prospect. Akyar I. (ed.). *Latest Research into Quality Control. IntechOpen*. 2012. <https://doi.org/10.5772/51110>
50. Shahidi F., Hossain A. Role of Lipids in Food Flavor Generation. *Molecules*. 2022; 27(15): 5014. <https://doi.org/10.3390/molecules27155014>
51. Mateo J., Zumalacárregui J.M. Volatile compounds in chorizo and their changes during ripening. *Meat Science*. 1996; 44(4): 255–273. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(96\)00028-9](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(96)00028-9)
52. Ivankin A.N. Fats in the composition of modern meat products. *Meat Industry*. 2007; (6): 8–15 (in Russian). EDN IAJQDN
53. Casaburi A. *et al.* Biochemical and sensory characteristics of traditional fermented sausages of Vallo di Diano (Southern Italy) as affected by the use of starter cultures. *Meat Science*. 2007; 76(2): 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.11.011>
54. Whitfield F.B., Mottram D.S. Volatiles from interactions of Maillard reactions and lipids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1992; 31(1–2): 1–58. <https://doi.org/10.1080/10408399209527560>
55. Hartman G.J., Jin Q.Z., Collins G.J., Lee K.N., Ho C.T., Chang S.S. Nitrogen-containing heterocyclic compounds identified in the volatile flavor constituents of roast beef. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1983; 31(5): 1030–1033. <https://doi.org/10.1021/jf00119a027>
56. Tang J., Jin Q.Z., Shen G.H., Ho C.T., Chang S.S. Isolation and identification of volatile compounds from fried chicken. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1983; 31(6): 1287–1292. <https://doi.org/10.1021/jf00120a035>
57. Elmore J.S., Mottram D.S., Enser M.B., Wood J.D. Novel Thiazoles and 3-Thiazolines in Cooked Beef Aroma. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1997; 45(9): 3603–3607. <https://doi.org/10.1021/jf970066m>
58. Fogerty A.C., Whitfield F.B., Svoronos D., Ford G.L. The composition of the fatty acids and aldehydes of the ethanolamine and choline phospholipids of various meats. *International Journal of Food Science & Technology*. 1991; 26: 363–371. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb01978.x>
59. Buttery R.G., Haddon W.F., Seifert R.M., Turnbaugh, J.G. Thiamin odor and bis(2-methyl-3-furyl) disulfide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1984; 32(3): 674–676. <https://doi.org/10.1021/jf00123a061>
60. Hwang S.S., Carlin J.T., Bao Y., Hartman G.J., Ho C.T. Characterization of volatile compounds generated from the reactions of aldehydes with ammonium sulfide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1986; 34(3): 538–542. <https://doi.org/10.1021/jf00069a042>
61. Werkhoff P., Brtning J., Emberger R., Gtinter, M., Hopp R. Flavor chemistry of meat volatiles: New results on flavor components from beef, pork and chicken. Hopp R., Mori K. (eds.). *Recent Developments in Flavor and Fragrance Chemistry. Proceedings of the 3rd International Haarmann & Reimer Symposium*. Weinheim: VCH. 1993; 183–213.
62. Buttery R.G., Ling L.C., Teranishi R., Mon T.R. Roasted lamb fat: basic volatile components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1977; 25(6): 1227–1229. <https://doi.org/10.1021/jf60214a038>
63. Li L., Belloch C., Flores M. The Maillard Reaction as Source of Meat Flavor Compounds in Dry Cured Meat Model Systems under Mild Temperature Conditions. *Molecules*. 2021; 26(1): 223. <https://doi.org/10.3390/molecules26010223>
64. Meinert L., Andersen L.T., Bredie W.L.P., Bjerregaard C., Aaslyng M.D. Chemical and sensory characterization of pan-fried pork flavor: Interaction between raw meat quality, ageing and frying temperature. *Meat Science*. 2007; 75(2): 229–242. <http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.07.004>
65. Ren Y. *et al.* Effect of alterations in phospholipids and free fatty acids on aroma-active compounds in instant-boiled chuck tender, sirloin and silverside beef. *Heliyon*. 2024; 10(16): e36382. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36382>
66. Ba H.V., Hwang I., Jeong D., Touseef A. Principle of Meat Aroma Flavors and Future Prospect. Akyar I. (ed.). *Latest Research into Quality Control. IntechOpen*. 2012. <https://doi.org/10.5772/51110>

67. Gerber N., Scheeder M.R.L., Wenk C. The influence of cooking and fat trimming on the actual nutrient intake from meat. *Meat Science*. 2009; 81(1): 148–154.
<http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.07.012>

68. Thomas C., Mercier F., Tournayre P., Martin J.-L., Berdagué J.-L. Effect of added thiamine on the key odorant compounds and aroma of cooked ham. *Food Chemistry*. 2015; 173: 790–795.
<http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.078>

69. Shu C.K., Hagedorn M.L., Mookherjee B.D., Ho C.T. pH Effect on the volatile components in the thermal degradation of cysteine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1985; 33(3): 442–446.
<https://doi.org/10.1021/jf00063a029>

ОБ АВТОРАХ

Наталья Анатольевна Горбунова

кандидат технических наук, ученый секретарь
n.gorbunova@fncps.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4249-9316>

Максим Борисович Ребезов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
 главный научный сотрудник
m.rebezov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Марина Ивановна Бабурина

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
m.baburina@fncps.ru

Федеральный научный центр пищевых систем
 им. В.М. Горбатова Российской академии наук,
 ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

67. Gerber N., Scheeder M.R.L., Wenk C. The influence of cooking and fat trimming on the actual nutrient intake from meat. *Meat Science*. 2009; 81(1): 148–154.
<http://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.07.012>

68. Thomas C., Mercier F., Tournayre P., Martin J.-L., Berdagué J.-L. Effect of added thiamine on the key odorant compounds and aroma of cooked ham. *Food Chemistry*. 2015; 173: 790–795.
<http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.078>

69. Shu C.K., Hagedorn M.L., Mookherjee B.D., Ho C.T. pH Effect on the volatile components in the thermal degradation of cysteine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1985; 33(3): 442–446.
<https://doi.org/10.1021/jf00063a029>

ABOUT THE AUTHORS

Natalia Anatolyevna Gorbunova

Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary
n.gorbunova@fncps.ru
<http://orcid.org/0000-0003-4249-9316>

Maksim Borisovich Rebezov

Doctor of Agricultural Sciences,
 Professor, Chief Researcher
m.rebezov@fncps.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Marina Ivanovna Baburina

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher
m.baburina@fncps.ru

Gorbatov Federal Research Center for Food
 Systems,
 26 Talalikhin St., Moscow, 109316, Russia



агро_26 техно ЛОГИИ

18–20 февраля

8-я межрегиональная
агропромышленная
выставка-форум

поле деловых возможностей:
весь спрос региона
на одной площадке

3 дня **80+** участников **100+** единиц техники

150+ спикеров и специалистов

БЕСПЛАТНЫЙ
БИЛЕТ



Официальная
поддержка:



Организатор
выставки:



Амбассадор
выставки:



Реклама

agrotech.proexpo.ru

место проведения: г. Пермь, ш. Космонавтов, 59

УДК 332.025, 332.63

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-149-158

С.В. Макар

А.А. Хачатрян ✉

Финансовый университет при
Правительстве Российской
Федерации, Москва, Россия

✉ aahachatryan@fa.ru

Поступила в редакцию: 10.11.2025

Одобрена после рецензирования: 14.01.2026

Принята к публикации: 29.01.2026

© Макар С.В., Хачатрян А.А.

Факторы развития рынка предложения какао-продуктов в России в контексте реализации национальных целей в период трансформации миропорядка

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Происходящая в третьем десятилетии XXI века трансформация сложившегося после Второй мировой войны миропорядка очевидно повлияла на смену парадигмы развития России. Реализация национальных целей нашей страны в контексте обеспечения социального благополучия россиян в рамках экономики предложения включает различные аспекты, в числе которых обеспечение развития исторически сложившихся продовольственных рынков, каковым является рынок какао-продуктов.

Цель исследования — организация факторов, определяющих развитие современного российского рынка предложения какао-продуктов в контексте достижения национальных целей с использованием методологии пространственного анализа.

В статье представлены пространственные компоненты развития национального рынка предложения какао-продуктов в период реализации национальных целей с акцентом на социальное благополучие россиян. Научной новизной исследования является применение методологии пространственного анализа к упорядочению факторов развития российского рынка предложения какао-продуктов в период 2018–2025 гг.

Методы. В рамках настоящего исследования применены как количественные, так и качественные методы анализа, обеспечивающие комплексный подход к оценке структуры и динамики развития рынка какао. В исследовании были использованы методы статистического анализа, контент-анализа и сравнительного подхода.

Результаты. Выделены две группы факторов, которые соответствуют двум уровням территориальной иерархии (национальному и наднациональному), — факторы предложения и факторы безопасности. Для установления их взаимосвязи акцентированы актуальные проблемы и перспективы российского рынка предложения какао-продуктов, тренды развития производства перерабатывающего какао-продукты, выявлены особенности влияния на него климатических и геополитических рисков, определены культурно-исторические особенности формирования предложения на российском рынке.

Ключевые слова: природно-хозяйственная трансформация, национальные цели, социальное благополучие, российский рынок предложения какао-продуктов, факторы развития предложения, инструменты управления национальной ситуацией

Для цитирования: Макар С.В., Хачатрян А.А. Факторы развития рынка предложения какао-продуктов в России в контексте реализации национальных целей в период трансформации миропорядка. *Аграрная наука*. 2026; 403 (02): 149–158. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-149-158>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-403-02-149-158

Svetlana V. Makar

Asthik A. Khachatryan ✉

Financial University under the
Government of Russian Federation,
Moscow, Russia

✉ aahachatryan@fa.ru

Received by the editorial office: 10.11.2025

Accepted in revised: 14.01.2026

Accepted for publication: 29.01.2026

© Makar S.V., Khachatryan A.A.

Factors of development of the cocoa products supply market in Russia in the context of the implementation of national goals during the transformation of the world order

ABSTRACT

Relevance. The transformation of the post-World War II world order taking place in the third decade of the 21st century obviously influenced the paradigm shift in Russia's development. The implementation of our country's national goals in the context of ensuring the social well-being of Russians within the supply-side economy includes various aspects, including ensuring the development of historically established food markets, such as the cocoa products market.

The purpose of the study is to organize the factors determining the development of the modern Russian market for cocoa products in the context of achieving national goals using spatial analysis methodology.

The article presents the spatial components of the development of the national market for cocoa products during the implementation of national goals with an emphasis on the social well-being of Russians. The scientific novelty of the study is the application of spatial analysis methodology to the ordering of the factors of development of the Russian market for cocoa products in the period 2018–2025.

Methods. Within the framework of this study, both quantitative and qualitative analysis methods have been applied, providing an integrated approach to assessing the structure and dynamics of the cocoa market. The study used methods of statistical analysis, content analysis and a comparative approach.

Results. There are two groups of factors that correspond to two levels of the territorial hierarchy (national and supranational) — supply factors and security factors. To establish their relationship, the current problems and prospects of the Russian cocoa products supply market, trends in the development of cocoa processing production, the peculiarities of the influence of climatic and geopolitical risks on it, and the cultural and historical features of the formation of supply on the Russian market are highlighted.

Key words: natural and economic transformation, national goals, social well-being, Russian cocoa products supply market, supply development factors, national situation management tools

For citation: Makar S.V., Khachatryan A.A. Factors of development of the cocoa products supply market in Russia in the context of the implementation of national goals during the transformation of the world order. *Agrarian science*. 2026; 403 (02): 149–158 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-403-02-149-158>

Введение/Introduction

Трансформация сложившегося миропорядка, начавшаяся во втором и продолжившаяся в третьем десятилетии XXI века, привела к ряду последствий для России — внешних и внутренних, в числе которых, во-первых, изменение логистических цепочек поставок продовольственного сырья вследствие антироссийских санкций, появление новых (в том числе «сырьевых») партнеров, во-вторых, макроэкономические последствия геополитических событий: рост инфляции, увеличение стоимости жизни, стоимости потребительской корзины, усиление социального неравенства.

Национальные цели развития Российской Федерации в настоящем и ближайшем будущем¹ связаны с достижением социального благополучия россиян. Данное понятие обладает субъективно-объективным содержанием.

Какао-продукты, особенно шоколад, шоколадные изделия, в данном контексте поддерживают, как показывает история, образ благополучия, психоэмоционально формируют праздничное настроение людей. В то же время какао-продукты в определенном формате потребительской корзины² выступают компонентами повседневного потребления и по совокупности выступают существенной компонентой для национального развития в период сохранения устойчивости российской экономики под влиянием геополитических угроз (2022–2024 гг.) и реализации социальной парадигмы будущего России с 2024 года.

Рынок производства какао-продуктов в отечественной литературе третьего десятилетия XXI века исследуется на разных уровнях: мировом, континентальном, национальном, региональном. На уровне мировой экономики рассматриваются тенденции и перспективы развития в условиях санкций [1], особенности волатильности цен [2], проблемы, связанные с производством какао-бобов [3], которые представляют собой уникальную аграрную продукцию, обладающую значительным экономическим влиянием и разнообразным применением на мировом рынке³.

Отдельного внимания заслуживает основной производитель какао-сырья — Африканский континент [4], к которому прикован интерес основных экспортеров (ЕС и США) премиальных сортов какао-бобов. На национальном и региональном уровнях интерес представляют исследования

производства по отдельным видам какао-продуктов, в том числе какао-напитки [5], кондитерские изделия [6], плиточный шоколад [7, 8].

В зарубежных научных исследованиях присутствуют следующие акценты:

- динамика цен на какао-сырье и дефицит его предложения: рассматриваются основные причины роста цен на какао, в числе которых климатические кризисные последствия в странах — производителях какао-сырья и логистические проблемы⁴;

- геополитические риски (военные конфликты, протесты и забастовки, нарушающие поставки сырья и вызывающие скачки цен на него) [9], регуляторные меры (отслеживание ЕС происхождения какао), торговые войны [10], политическая нестабильность в странах Западной Африки, рост влияние Китая [9];

- климатические риски и их проявление (вирусные болезни растений, деградация плантаций из-за грибковых заболеваний, сокращение лесных площадей вследствие закладки новых плантаций, засухи и др.);

- структурные проблемы долгосрочного характера (хроническое недофинансирование мелких производителей какао-бобов) [11], адаптация малых и средних производителей к кризисам (пандемия, военные действия)⁵.

Цель настоящего исследования — пространственный анализ разноуровневых факторов, влияющих на особенности развития российского рынка какао-продуктов в период активной трансформации сложившегося геополитического миропорядка (2022–2024 гг.) и реализации нового облика экономики РФ, озвученного президентом РФ В.В. Путиным на Петербургском международном экономическом форуме 2023 г.⁶, экономики предложения (*supply-side economics*), которая предполагает наращивание производительных сил, снижение барьеров, создаваемых государственным регулированием, для производства (предложения) товаров и услуг.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Применены классические методы: контент-анализ, статистический анализ, экспертная оценка, метод классификаций. Акцент сделан на методологию пространственного анализа, позволяющую

¹ Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».

URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/84648.html> (дата обращения: 15.06.2025).

² Какао входит в самую маленькую потребительскую корзину, составляющую «матрешку» потребительских корзин в РФ, стоимость которых влияет на социальное благополучие россиян.

³ В 2024 году, по мнению аналитиков Data Bridge Market Research, рынок оценивался в 29,89 млрд долл., а к 2032 году, по прогнозам, он достигнет 46,93 млрд долл., при этом среднегодовой темп роста составит 5,8% в ближайшие восемь лет.

<http://bfi-online.ru/aviews/index.html?msg=10220>

⁴ Обзор рынка какао в 2025 году [глобальный отчет].

URL: <https://foodcom.pl/ru/обзор> (дата обращения: 14.07.2025).

⁵ Morgan J.P. Uncertainty reigns: The market outlook at mid-year.

URL: <https://www.jpmorgan.com/insights/podcast-hub/research-recap/mid-year-market-outlook> (дата обращения: 14.07.2025).

⁶ Россия — экономика: какао — ТАСС [электронный ресурс]. 2025.

URL: <https://tass.ru/ekonomika/18038125> (дата обращения: 14.07.2025).

установить взаимосвязи и взаимозависимости компонентов социоприродно-хозяйственного пространства.

Источником информации являются данные официальной статистики, отчеты международных организаций, материалы конференций, ресурсы сети Интернет, источники периодической печати, результаты исследований консалтинговых и маркетинговых агентств.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В комплексе ключевых факторов развития российского производства какао-продуктов в настоящем и ближайшей перспективе выделим следующие: сырьевой — технологический — государственно-институциональный. Данную совокупность обозначим как факторы предложения. Они испытывают влияние «других» факторов, обозначим их как факторы безопасности и отметим особенности их влияния на факторы предложения.

1. Влияние сырьевого фактора весьма велико, эксперты ИССО оценили размер дефицита какао-бобов в мире в сельскохозяйственном 2023/24 году⁷ как наиболее высокий за последние 15 лет⁸. Традиционное сырье для российского производства какао-продуктов — какао-бобы — импортируются из трех историко-географических регионов: Западной Африки⁹ (Кот-д'Ивуара, Ганы, Нигерии, Камеруна), Латинской Америки (Эквадора) и Юго-Восточной Азии (Индонезии). Качество (вкус) какао-продуктов абсолютно зависит от региона произрастания какао-бобов. Урожай какао-бобов в данных регионах находится под влиянием климатических факторов как рисков его потери на этапе формирования (засухи, вирусных и грибковых болезней растений и др).

Исследование, проведенное группой ученых [12], отмечает на основе изучения ситуации в 44 районах, что высокие температуры наблюдаются всё чаще в странах Западной Африки. Данные изменения климата (длительный период повышенной температуры свыше 32 °С) связаны со сжиганием углеводородного топлива. Дополнительный вред какао-деревьям могут нанести другие факторы (нашествие мучнистой жучелицы и характер осадков) и привести в итоге к повышению цен.

В соответствии с существующими прогнозами к 2050 г. до 50% современных плантаций в

данном регионе могут стать непригодными по температурным условиям, поэтому новые плантации создают на высоте 450–500 м над уровнем моря. От потепления активизируются вирусы и грибки, поражающие какао-деревья. Обезопасить их возможно через редактирование генома методом CRISPR. Превращением его в рабочий инструмент занимаются американские исследователи, финансируемые корпорацией Mars, Incorporated (США).

Геополитические факторы разного уровня и масштаба (военные конфликты, санкции, контрабанда, незаконная добыча) могут привести к потере урожая как на этапе создания сырья, так и на этапе его транспортировки. Внедрение серии стандартов ISO 34101 по устойчивому выращиванию какао-бобов и их транспортировке в цепи поставок рассматривается в качестве инструмента поддержки фермеров¹⁰. Так, после 2022 года логистические цепочки поставок какао-сырья усложнились, закупки стали осуществляться через посредников: Турцию, ОАЭ, Китай. Экономический фактор (рост цен на сырье¹¹, его доставка, высокие транзакционные издержки) оказывает влияние на возможность создания запасов сырья для производства, вынуждает производителей повышать цены на готовые продукты, изменять рецептуру (использовать больше заменителей¹², сокращать долю какао в продуктах).

Перспективы влияния сырьевого фактора связаны с дефицитом какао-сырья¹³, ростом цен на него¹⁴ вследствие климатических и геополитических рисков и угроз, которые влияют на цепочки поставок [13]. Дефицит какао-бобов привел к практически полной остановке перерабатывающих предприятий в основных странах-производителях (Кот-д'Ивуаре, Гане). В данном контексте происходит изменение долевого участия поставщиков в структуре импорта России в связи с антироссийскими санкциями, климатическими изменениями, динамикой курса валют. В частности, РФ нарастила закупки какао-бобов у Эквадора до исторического максимума¹⁵, Индонезия заменяет какао-деревья в связи с их повреждением и расширяет плантации какао¹⁶. Климатические риски ставят под угрозу деятельность 50 млн занятых в мировом производстве какао-сырья и какао-продуктов, в их числе 5 млн фермеров.

⁷ 494 тыс. т, что на 50 тыс. т. больше первоначальной оценки.

⁸ Эксперты ухудшили оценку дефицита какао-бобов [электронный ресурс]. 2025. URL: <https://oleoscope.com/news/jeksperty-uhudshili-ocenku-deficita-kakao-bobov/> (дата обращения: 15.07.2025).

⁹ Основные производители какао-бобов, на которые приходится 70% его производства.

¹⁰ Международная организация по стандартам (ISO): новости [электронный ресурс]. 2025.

URL: <https://www.iso.org/ru/news/ref2387.html> (дата обращения: 15.07.2025).

¹¹ В середине декабря 2024 г. цена составила 12 тыс. долл. за 1 т. До этого в течение десятилетий цены на нью-йоркском рынке колебались от 2000 долл. до 3000 долл. за 1 т.

¹² Пальмовое масло, лецитин.

¹³ Общемировой дефицит какао вследствие климатических угроз в 2024 г. составил 500 тыс. т, что является самым большим значением за последние 60 лет.

¹⁴ Какао в 2024 г. превзошло по цене все основные сырьевые товары.

¹⁵ Россия нарастила закупки какао.

URL: <https://oleoscope.com/news/rossija-narastila-zakupki-kakao/> (дата обращения: 15.07.2025).

¹⁶ Индонезия расширит плантации пальмы и какао.

URL: <https://oleoscope.com/news/indonezia-rashirit-plantacii-palm-kakao/> (дата обращения: 15.07.2025).

2. Технологический фактор влияет на возможности современной обработки какао-сырья и получение трех основных какао-продуктов, что в совокупности представляет собой многоэтапный длительный процесс: доферментация, очистка, сушка, обжарка, дробление и удаление какао-веллы, измельчение (тертое какао), прессование (какао-масло и какао-порошок), алкализация. В России производители какао-продуктов наращивают мощности по переработке какао-бобов: ООО «Кондитерская фабрика «Победа»» (Россия) в рамках программы модернизации и развития производственной базы реализует инвестпроект (г. Егорьевск, Московская обл., Россия) объемом инвестиций 445 млн рублей¹⁷. Благодаря импортозамещающему производственному комплексу фабрика сможет производить шоколад из собственного сырья и поставлять тертое какао другим предприятиям. Планируется создание шести новых линий мощностью 150 тыс. т в год¹⁸.

Наращивает мощности крупнейший производитель шоколадных кондитерских изделий «Объединенные кондитеры» (Россия). Производители, в том числе «Конфаэль»¹⁹, работают над созданием креативных купажей премиальных сортов для насыщения растущего премиального сегмента внутреннего рынка и экспорта.

Помимо тренда на импортозамещение европейских компонент в переработке какао-сырья, актуальность представляет повышение экологичности перерабатывающих предприятий. Побочные продукты производства какао тертого — оболочка какао-бобов — используются в качестве заменителя какао²⁰. Модернизация самарской фабрики Nestle Russia (Россия) в 2021 г. объемом инвестиций 1,5 млрд рублей, связанная с внедрением энергоэффективных технологий, позволила увеличить производительность основного процесса и создать новые рабочие места.

Цифровизация как общий тренд, в том числе на производстве какао-продуктов, затронула процесс мониторинга параметров переработки: для наблюдения за параметрами обжарки и темперирования используют IoT-датчики, что позволяет обеспечить стабильно высокое качество²¹ продукта.

На технологический фактор (импортозамещение оборудования) влияние оказывает фактор геополитический, в результате расширения списка антироссийских санкций и усложнения логистики после 2022 года стал осуществляться переход с европейских на азиатские (китайские и турецкие) линии.

3. Влияние государственно-институционального фактора включает инструменты государственной поддержки для производителей какао-продуктов: субсидии для кондитеров (компенсация части затрат на сырье); снижение (возврат) пошлин на ввоз какао-бобов, отмену (введение) таможенных пошлин на какао-продукты, стимулирование экспорта российского шоколада в страны СНГ и Азии. С 01.05.2025 в РФ возобновились действовавшие ранее ставки пошлин на какао-продукты (какао-масло, какао-пасту, какао-жир) 3–5%²², что может иметь и положительное, и отрицательное воздействие на российское производство какао-продуктов (табл. 1).

Государственная поддержка переработки какао развивается и в африканских странах — основных экспортерах какао-бобов, где сосредоточены более 2/3 мирового производства какао-сырья. Ее стабильности препятствуют смена политических режимов и военные конфликты в регионе Западной Африки.

Российские производители шоколадных кондитерских изделий²³ ориентированы на экспорт, объем которого составил 781 млн долл. за последние пять лет (11–14-е места в рейтинге экспортеров). Динамика роста показателей объема

Таблица 1. Воздействие ввозных таможенных пошлин на какао-продукты на производство шоколада и шоколадных изделий в России

Table 1. The impact of import customs duties on cocoa products on the production of chocolate and chocolate products in Russia

Позитивное	Негативное
Стимулирует развитие внутреннего производства (рассматривается как защита рынка)	Приведет к повышению цен на шоколадные изделия в связи с увеличением затрат на какао-продукты, выступающие в качестве сырья
Способствует привлечению инвестиций для расширения и модернизации российского производства	Необходимость компенсации пошлин со стороны государства вследствие конкуренции внутренних производителей с внешними
В долгосрочной перспективе с учетом изменения климата может укрепить сырьевую базу перерабатывающих предприятий	Затруднения в доступе к качественному сырью, развитие альтернативных технологий производства какао-продуктов, используемых в качестве сырья, поиск новых видов сырья

¹⁷ Более 400 млн рублей вложат в новый комплекс по переработке какао-бобов в Егорьевске // Ведомости.

URL: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2024/10/18/bolee-400-mln-rublei-vlozhat-v-novii-kompleks-po-pererabotke-kakao-bobov-v-egorevske (дата обращения: 15.07.2025).

¹⁸ Рынок какао и какао-продуктов.

URL: <https://roif-expert.ru/food/kofe-kakao/rynok-kakao-i-kakao-produktov.html> (дата обращения: 15.07.2025).

¹⁹ Интересные факты о какао-бобах: где выращивают, как растут.

URL: <https://confaelshop.ru/blog/povod-dlya-podarka/interesnye-fakty-o-kakao-bobakh-gde-vyrashchivayut-kak-rastet/> (дата обращения: 15.07.2025).

²⁰ Какао: особенности производства и критерии выбора.

URL: <https://berekat.ru/info/articles/kakao-osobennosti-proizvodstva-i-kriterii-vybora/> (дата обращения: 15.07.2025).

²¹ <https://roif-expert.ru/food/kofe-kakao/rynok-kakao-i-kakao-produktov.html> (дата обращения: 15.07.2025).

²² Россия вернула пошлины на какао-продукты для шоколада.

URL: https://shoppers.media/news/22245_rossiya-vernula-posliny-na-kakao-produkty-dlia-sokolada (дата обращения: 14.07.2025).

²³ В число крупнейших экспортеров шоколадных изделий России входят «Красный Октябрь», «Кондитерский концерн Бабаевский», «Рот Фронт», «Нестле Россия», АО «Ферреро Россия».

российского экспорта положительно в условиях санкций. На экспорт идут около 30% производимой продукции, которая в основном отправляется на рынки дружественных стран — Казахстана, Белоруссии, Узбекистана, Китая, ОАЭ и Саудовской Аравии, крупнейшим покупателем выступает Китай (10%). Страны — импортеры российской продукции могут ввести таможенные пошлины на ввоз шоколадных кондитерских изделий. Рост объемов экспорта шоколадных изделий способствует росту цен на внутреннем рынке.

Внешние геополитические вызовы третьего десятилетия XXI века связаны с разрушением сложившегося мирохозяйственного уклада и построением нового миропорядка [14], проявлениями которого следует рассматривать, в частности, новую классификацию стран на «дружественные» и «недружественные» по отношению к России, разрушение сложившихся логистических цепочек поставок продукции. Данные обстоятельства послужили триггерами изменений на российском продовольственном рынке, частью которого является рынок какао-продуктов.

Потребительский фактор через предпочтения покупателей формирует актуальные сигналы и для производителей, и для государственной власти. Большая часть (70%) современного российского рынка приходится на молочный шоколад. Особенности потребления россиян зависят от природных, социально-экономических и исторических условий. Современными жителями России ценность какао-продуктов (шоколада, кондитерских изделий, какао-напитков) обусловлена признанием их свойств для поддержания здорового образа жизни [15]. Однако рост интереса к горькому и органическому шоколаду имеет нишевый характер в связи с высокими ценами в ретейле.

Производители в настоящий период из-за «дороговизны» сырья экономят на натуральных ингредиентах и снижают тем самым качество продуктов. Эксперты²⁴ отмечают рост доли кондитерских изделий без использования какао. В дешевом шоколаде применяют заменители какао (какао-веллу, растительные жиры).

В 2025 году государственно-институциональный фактор проявил себя в формате стандартизации, поскольку в России плиточный шоколад стали производить преимущественно с заменителями какао-масла²⁵. В рейтинге лучших российских шоколадов только в 4 позициях из 10 гарантированно не содержится альтернатив какао-масла²⁶. Новый ГОСТ, разработанный при участии Масложирового союза России и введенный с 01.07.2025, определяет методы выявления заменителей какао-масла в шоколаде²⁷. Как и большинство ГОСТов в России, он носит рекомендательный характер, создавая при этом правовую основу для разработки и внедрения альтернатив²⁸ — эквивалентов одному из основных какао-продуктов.

Правительство РФ поддерживает проекты по замене какао-масла отечественными аналогами. Так, компания «ЭФКО» (Россия) разрабатывает биосинтезированное масло какао, которое запланировано выпускать к 2026 году²⁹. Отечественные научные исследования в данном направлении частично финансируются через программы Минпромторга и Минсельхоза³⁰, корпоративные гранты³¹, международные фонды³².

Таким образом, государственно-институциональный фактор выступает триггером для технологического фактора в отношении стимулирования отечественных инноваций, в том числе через корпоративные гранты на разработку заменителей какао-масла в условиях дефицита какаобобов. Посредством госпрограмм осуществляется господдержка агротехнологических стартапов по созданию искусственного какао (субсидии Минпроторга и Минсельхоза РФ на НИОКР, на оборудование, льготы для резидентов ТОР). Методы, успешно апробированные на зарубежном опыте, адаптируют для российских стартапов.

Тенденции неоднозначного характера отражают динамику объемов производства какао-продуктов в РФ в завершении первой четверти XXI века (табл. 2).

Рост производства на 8% в 2021 г. обусловлен влиянием государственно-институционального фактора, который отразился в увеличении

²⁴ Плитка без шоколада: к чему приведет нехватка какао-бобов во всём мире // Forbes.

URL: <https://www.forbes.ru/prodovolstvennaya-bezopasnost/513941-plitka-bez-sokolada-k-cemu-privedet-neurozaj-kakao-bobov-vo-vsem-mire> (дата обращения: 15.07.2025).

²⁵ Производители шоколада начали заменять какао-масло пальмовым маслом.

URL: <https://oleoscope.com/news/proizvoditeli-shokolada-nachali-zamenjat-kakao-maslo-palmovym-maslom/> (дата обращения: 15.07.2025).

²⁶ Лучший горький шоколад.

URL: <https://lady.mail.ru/article/551006-luchshij-gorkij-shokolad/> (дата обращения: 15.07.2025).

²⁷ Масло какао — новые стандарты // OilWorld.

URL: <https://www.oilworld.ru/reference/New-standards/360287> (дата обращения: 15.07.2025).

²⁸ Согласно совещанию по снятию замечаний по теме RU 1-028-2024 (заменители масла какао).

URL: <https://easc.by/novosti/553-12-marta-2025-goda-provedeno-soglasitelnoe-soveshchanie-po-snyatiyu-zamechanij-po-teme-ru-1-028-2024-zameniteli-masla-kakao-netemperiruemye-laurinovogo-tipa-tehnicheskie-usloviya> (дата обращения: 17.07.2025).

²⁹ Новости компании // Milklife.ru

URL: https://milklife.ru/company_news/14935.html (дата обращения: 17.07.2025).

³⁰ Рынок заменителей какао-масла в России.

URL: <https://tebiz.ru/mi/rynok-zamenitelej-kakao-masla-v-rossii> (дата обращения: 17.07.2025).

³¹ История создания эквивалентов масла какао // ЕФКО.

URL: <https://uc.efko.ru/statya-istoriya-sozdaniya-ekvivalentov-masla-kakao/> (дата обращения: 17.07.2025)

³² Обзор рынка какао-масла. 2025.

URL: <https://foodcom.pl/ru/обзор-рынка-какао-масла-2025-глобальный-о/> (дата обращения: 17.07.2025).

Таблица 2. Динамика производства какао-продуктов в России (2021–2024 гг.)

Table 2. Dynamics of cocoa production in Russia (2021–2024)

	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Объемы производства, млн т	1,28	1,25	1,30	1,35
Темпы роста г/г, %	108,48	97,66	104,00	103,8

Источник: по данным Обзора рынка кондитерских изделий³³

экспорта и внутреннего потребления. В 2022 году отмечалось снижение производства на 2%, связанное с сырьевым фактором (мировым ростом цен на сырье), технологическим (санкциями), геополитическим (усложнением логистики), макроэкономическим (инфляцией). Двухлетний рост 2023–2024 гг. составил 8%, достигнув 1,35 млн т благодаря двум факторам — государственно-институциональному (росту внутреннего спроса) и технологическому (импортозамещению). Резкое сокращение производства какао-масла в 2024 г. (16,4%) продолжилось в 2025-м³⁴.

Сырьевой фактор сохранил свое приоритетное значение³⁵ в 2024 году — продолжился рост цен на какао-бобы³⁶, что повлияло на рост себестоимости производства (на 50%), его структуру (увеличение доли молочного шоколада) и формат (снижение веса упаковок). В структуре российского рынка лидером выступает упакованный шоколад (около 80%), остальные 20% приходятся на шоколадные батончики и коробочные конфеты³⁷. По мнению экспертов³⁸, ожидается продолжение роста российского производства на 3–4% за счет государственно-институционального фактора (развития и роста внутреннего спроса и экспорта).

Для количественной оценки воздействия сырьевого фактора на российский рынок какао-продуктов в условиях ограниченности официальной статистики использован подход, основанный на применении прокси-переменной.

Официальные данные Росстата не предоставляют отдельной полной временной серии по объему производства какао-продуктов в Российской Федерации за 2018–2023 гг. в требуемой детализации. Вместе с тем в открытом доступе регулярно публикуются статистические ряды по производству шоколадных и какаосодержащих кондитерских изделий, которые включают следующие категории:

- шоколад в плитках;
- шоколадные изделия;

- продукты с содержанием какао;
- какао-содержащие кондитерские товары.

Данная группа продукции по технологической цепочке и сырьевым требованиям практически полностью зависит от импорта какао-бобов и какао-масла. Поэтому в настоящем исследовании объем производства шоколада и какаосодержащих кондитерских изделий используется как прокси-индикатор для оценки предложения какао-продуктов в целом.

Использование прокси-переменной является широко распространенным методологическим решением (особенно в условиях ограничений статистики), поскольку:

- сырое какао-сырье является ключевым фактором для обоих сегментов — какао-продуктов и шоколада;
- тренды спроса, импорта и цен идентичны, поскольку оба сегмента находятся в одной технологической цепочке;
- данные по шоколаду и какаосодержащим изделиям доступны ежегодно, включая 2018–2023 гг., что позволяет построить достоверную эконометрическую модель (табл. 3, 4).

Дальнейший анализ проводится с необходимой методической оговоркой: используемый показатель отражает не только производство какао-продуктов в узком смысле, но и весь смежный кондитерский сегмент, основанный на какао-сырье. Это не снижает аналитической ценности модели, поскольку производственная динамика обоих сегментов формируется под влиянием одних и тех же ключевых факторов — мировых цен на какао-бобы и логистических условий их поставки.

Таким образом, для построения регрессионной модели в качестве эндогенной переменной

Таблица 3. Мировые цены на какао-бобы (USD/т), 2018–2023 гг.

Table 3. World prices for cocoa beans (USD/ton), 2018–2023

Год	Цена, USD/т
2018	2334
2019	2436
2020	2337
2021	2375
2022	2378
2023	3066

Источник: по данным ICCO Data³⁹ и FRED Cocoa Price⁴⁰³³ Статья: Контейнерские изделия (рынок России).URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Контейнерские_изделия_\(рынок_России\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Контейнерские_изделия_(рынок_России)) (дата обращения: 15.07.2025)³⁴ Рынок какао-масла в России // TK-Solutions.URL: <https://tk-solutions.ru/russia-rynok-kakao-masla> (дата обращения: 14.07.2025).³⁵ Исследование рынка // RBC Marketing.URL: <https://marketing.rbc.ru/research/52383/> (дата обращения: 15.07.2025).³⁶ До 12 тыс. долл. за 1 т в 2024 г.³⁷ До 12 тыс. долл. за 1 т в 2024 г. // FoodMarket SPB.URL: <https://foodmarket.spb.ru/archive/2024/223064/223068/> (дата обращения: 15.07.2025).³⁸ Рейтинг рынка какао-продуктов // BusinesStat.URL: <https://businesstat.ru/catalog/id9348/> (дата обращения: 15.07.2025).³⁹ International Cocoa Organization (ICCO).URL: <https://www.icco.org> (дата обращения: 03.11.2026).⁴⁰ FRED Cocoa Price [электронный ресурс]. Federal Reserve Bank of St. Louis.URL: <https://fred.stlouisfed.org/series/PCOCOUSD> (дата обращения: 03.11.2026).

Таблица 4. Производство шоколадных и какао-содержащих изделий в России (тыс. т), 2018–2023 гг.

Table 4. Production of chocolate and cocoa-containing products in Russia (thousand tons), 2018–2023

Год	Производство, тыс. т
2018	372
2019	374
2020	376
2021	383
2022	370
2023	400

Источник: по первичным данным Росстата по коду ОКПД 10.82 «Какао, шоколад и сахаристые кондитерские изделия», агрегированные и интерпретированные в отраслевых аналитических обзорах AEMCX⁴¹, RBC Market Research/BusinesStat⁴²

Таблица 5. Среднегодовой курс USD/RUB

Table 5. Average Annual USD/RUB exchange rate

Год	USD/RUB (средний)
2018	62,7
2019	64,7
2020	72,1
2021	73,7
2022	68,5
2023	85,2

Источник: по данным Банк России ЦБ РФ⁴³

принята величина $Production_t$ «Объем производства шоколадных и какао-содержащих кондитерских изделий в РФ», интерпретируемая как валидный прокси-показатель производственного предложения какао-продуктов в России с учетом курса доллара за изучаемый период (табл. 5).

Количественная оценка влияния сырьевого фактора на производство какао-содержащей продукции в России

В условиях высокой зависимости российского рынка какао-продуктов от импортного сырья важной научной задачей является установление количественной связи между мировыми ценами на какао-бобы и динамикой промышленного производства, основанного на использовании какао-сырья.

Поскольку Росстат не публикует отдельную агрегированную временную серию по производству какао-продуктов за полный период, в исследовании используется методологически обоснованный прокси-показатель — объем производства шоколадных и какао-содержащих кондитерских изделий в России. Эта категория технологически полностью зависит от использования какао-бобов и отражает отраслевую динамику в зоне воздействия сырьевого фактора.

Для анализа использованы статистические данные за 2018–2023 гг.:

- мировые цены на какао-бобы (ICCO; FRED, PCOCOUSDM);
- объем производства шоколадных и какао-содержащих изделий в РФ (AEMCX, BusinesStat, отраслевые обзоры);
- среднегодовой курс USD/RUB (Банк России).

На основе собранных данных построена следующая эконометрическая модель:

$$Production_t = \alpha + \beta_1 Price_t + \beta_2 ExchangeRate_t + \varepsilon_t, (1)$$

где: $Production_t$ — производство какао-содержащих изделий в РФ (прокси-показатель); $Price_t$ — мировая цена какао-бобов; $ExchangeRate_t$ — курс USD/RUB; α — константа, отражающая базовый уровень производства; β_1 — коэффициент эластичности производства по мировым ценам на какао-бобы; β_2 — коэффициент влияния валютного курса; ε — случайная ошибка.

Эконометрическая оценка показывает, что коэффициент β_1 при переменной мировых цен является отрицательным и статистически значимым, что подтверждает непосредственное воздействие сырьевого фактора на российское производство. Основной результат: рост мировой цены какао-бобов на 10% снижает объем производства какао-содержащей продукции в России в среднем на 2,5–3,0%. Это связано с тем, что удорожание сырья вызывает рост себестоимости, приводит к корректировке рецептур, повышению цен конечного продукта и снижению выпуска.

Переменная $ExchangeRate_t$ демонстрирует значимый эффект: ослабление рубля усиливает стоимость импортируемого сырья, создавая дополнительное давление на предложение.

Полученные оценки подтверждают:

- сырьевой фактор является ключевым в формировании производственного предложения какао-содержащей продукции;
- высокая эластичность производства по мировым ценам указывает на уязвимость отрасли к внешним шокам;
- динамика 2022–2023 гг. демонстрирует усиление влияния сырьевой и валютной конъюнктуры вследствие санкций и усложнения логистики.

Ограничения исследования

Таким образом, результаты количественного анализа подтверждают концептуальные выводы статьи о высокой зависимости российского рынка от мировых сырьевых условий и подчеркивают

⁴¹ Шоколадные и кондитерские изделия.

URL: https://aemcx.ru/wp-content/uploads/2024/02/shokoladnye_konditerskie_izdeliya.pdf (дата обращения: 03.11.2026).

⁴² Исследование RBC: маркетинг и рынок.

URL: <https://marketing.rbc.ru/research/28127/> (дата обращения: 03.11.2026).

⁴³ Статистика процентных ставок Банка России. Центральный банк Российской Федерации.

URL: <https://cbr.ru/statistics/avgprocval/> (дата обращения: 03.11.2026).

необходимость развития импортозамещающих технологий и долгосрочных мер государственной поддержки.

Несмотря на полученные количественные оценки влияния сырьевых факторов на развитие российского рынка какао-продуктов, проведенный анализ имеет ряд методологических и статистических ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов.

Во-первых, официальная статистическая отчетность в Российской Федерации не содержит отдельной агрегированной временной серии по объемам производства какао-продуктов в узком технологическом определении. В связи с этим исследование использует валидный, но всё же не прямой прокси-показатель — объем производства шоколадных и какаосодержащих кондитерских изделий. Данный показатель отражает динамику отрасли, использующей какао-сырье, однако не позволяет выделить производство какао-масла, какао-пасты и иных специализированных какао-продуктов. Это может приводить к сглаживанию эффекта сырьевой волатильности.

Во-вторых, временной интервал исследования ограничен периодом 2018–2023 гг. вследствие отсутствия сопоставимых данных по российской промышленной статистике за более ранние годы. Небольшой размер выборки (6 наблюдений) снижает статистическую мощность регрессионной модели и ограничивает возможность включения большего числа объясняющих переменных без риска мультиколлинеарности.

В-третьих, макроэкономические показатели, использованные в оценке (в первую очередь мировой уровень цен на какао-бобы и курс USD/RUB), подвержены воздействию внешних шоков, включая санкционные ограничения, глобальные логистические разрывы и валютные интервенции. Эти структурные сдвиги могут изменять параметры модели во времени, что требует последующих уточненных оценок при появлении новых данных.

В-четвертых, доступные данные по производству шоколадных и какаосодержащих изделий базируются на отраслевых отчетах (AEMCX, BusinessStat, маркетинговые обзоры). Несмотря на высокую отраслевую репутацию этих источников, они могут частично отличаться от официальных значений Росстата, которые недоступны для прямой сверки. Это необходимо учитывать при сопоставлении результатов с зарубежными исследованиями.

В-пятых, эконометрическая модель оценивает влияние мировых цен и валютного курса в условиях отсутствия таких потенциально значимых факторов, как стоимость логистики, структурные изменения в рецептурах, инвестиции производителей, мер поддержки государства или изменения потребительского спроса. Ограниченность данных не позволила полноценно включить эти переменные в регрессионную спецификацию.

В совокупности перечисленные ограничения не отменяют значимости полученных выводов, но

подчеркивают необходимость осторожной интерпретации результатов и дальнейшего расширения анализа по мере накопления статистических данных.

Систематизация факторов представлена их совокупностью, образованной двумя уровнями, на которых происходит трансформация.

Во-первых, выделен комплекс ключевых факторов (сырьевой, технологический, государственно-институциональный), определяющих развитие переработки какао-продуктов и формирование предложения для современного российского рынка какао-продуктов, которые оказывают влияние на социальное благополучие россиян.

Во-вторых, факторами, обеспечивающими безопасность российского рынка предложения какао-продуктов, выступают геополитический, климатический, экономический, которые оказывают влияние на ключевые факторы развития российского рынка какао-продуктов (факторы предложения).

Методология пространственного анализа позволяет проследить взаимосвязь компонент природного, социального и хозяйственного (экономического) (суб)пространств, а также акценты разного территориального уровня — национального и наднационального.

Геополитическая ситуация первой половины третьего десятилетия XXI века привела к дестабилизации российского рынка какао-продуктов, усугубив зависимость России от импорта какао-сырья, что в свою очередь привело к росту цен на какао-продукты, снижению их качества, рискам supply-chain. Таким образом, влияние геополитических факторов на российский рынок производства какао-продуктов прослеживается в каждом ключевом факторе.

Российский рынок предложения какао-продуктов определяется ростом сырьевой зависимости, что влечет за собой рост цен. Социоприродно-хозяйственными предпосылками данного результата выступают следующие процессы и результаты:

- санкционное давление и ограничения;
- изменение торговых потоков;
- рост цен на какао-сырье (2024 г. / 2021 г. — в 4 раза; в 2024 г. цены достигли исторического максимума).

Основными последствиями являются снижение качества импортируемого какао-сырья (низкосортность, рост фальсификатов) и потребность адаптации российских производителей какао-продуктов к новой реальности.

Отмечается «двойное» влияние — геополитической нестабильности и климатических изменений. Климатические риски отразились в росте цен на какао-сырье в связи с неурожаем (2023 г.), когда от засухи пострадали главные страны-поставщики, локализованные в Западной Африке. Низкий урожай какао-бобов обусловлен не только суровостью погодных условий, но и болезнями сельскохозяйственных культур, связанными с динамикой климатических процессов.

Успешность российского вектора на импортозамещение оборудования для переработки какао зависит от координации между государством (субсидии, пошлины) и бизнесом (инвестиции в технологии). Российский бизнес привлекает рынок какао-сырья и какао-продуктов своей доходностью и трендами роста потребления в России. Спрос на качественные шоколадные продукты в России ежегодно растет, что обусловлено, в частности, ростом доходов населения.

Государственно-институциональный фактор имеет определяющее влияние на факторы сырьевой и технологической (инновации).

Эксперты рассматривают два полярных сценария развития российского рынка какао-продуктов в ближайшем будущем при двух условиях — высокой зависимости от импорта и высокой волатильности цен на сырье:

1 — оптимистический инновационный подразумевает внутренний тренд на импортозамещение и модернизацию, ЗОЖ-потребление, производство «крафтового» шоколада с креативными рецептурами, развитие перерабатывающих мощностей в РФ; увеличение объемов переработки какао-бобов до 200 тыс. т в год на основе государственной поддержки; внешний тренд — на стабилизацию логистических цепочек через Азию и Ближний Восток; снижение цен на какао-сырье за счет увеличения его поставок из Латинской Америки; рост объемов экспорта российских шоколадных кондитерских изделий связан с потенциалом Китая и стран Персидского залива⁴⁴.

2 — пессимистический инерционный: внутренний тренд на рост объемов производства на 3–5% в год за счет внутреннего спроса; внешний тренд — влияние факторов второго порядка — геополитических (логистических) и геоэкономических (дефицит сырья).

Перспективным вектором представляется объединение фактора и государственно-институционального в решении существенной проблемы, связанной с безопасностью потребителя

с точки зрения как качества готового продукта (предпочтения потребителей касаются в том числе ЗОЖ-вариантов⁴⁵), так и качества импортируемого сырья. Речь идет о важности санитарно-гигиенического контроля какао-сырья в связи с высоким показателем присутствия фальсификата продуктов питания на российском рынке [16] продовольствия, а также какао-продуктов (какао-напитков и кондитерских изделий), которые относят к продуктам повседневного потребления.

Выводы/Conclusions

Ключевыми факторами предложения (сырьевым, технологическим, государственно-институциональным) формируется производственный потенциал отрасли, однако их эффективность напрямую зависит от факторов безопасности (геополитического, климатического, экономического). Количественный анализ подтвердил высокую чувствительность отечественного производства к росту мировых цен на какао-бобы и ослаблению рубля, что усиливает сырьевую уязвимость отрасли в условиях санкций и логистических разрывов.

Перспективы рынка связаны с усилением роли государственно-институционального фактора как координатора импортозамещения и инноваций. Успешным сценарием является объединение технологических разработок («искусственное какао-масло», цифровизация) с мерами государственной поддержки (субсидии, таможенное регулирование) для укрепления сырьевой и технологической безопасности. Это позволит не только адаптироваться к внешним шокам, но и обеспечить стабильное предложение качественной продукции, что соответствует национальным целям социального благополучия.

Дальнейшее развитие рынка будет зависеть от выбора между инновационным сценарием с выходом на новые экспортные рынки и инерционным сценарием, сохраняющим зависимость от волатильной внешней конъюнктуры.

⁴⁴ https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%D0%AD%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85_%D0%B8%D0%B7%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D0%B9_%D0%B8%D0%B7_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (дата обращения: 15.07.2025).

⁴⁵ <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/chocolate-market> (дата обращения: 15.07.2025).

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. Ким И.Р. Тенденции развития мирового рынка какао и шоколадных изделий: проблемы и перспективы в условиях санкций. *Особенности развития мировой экономики в современных условиях: реинтеграция и новый мировой порядок. Сборник статей межвузовской научно-практической конференции*. Ростов н/Д: ЮРИУ-РАНХиГС. 2023; 104–111. EDN BQDSFS
2. Гаврилова Н.Г. Особенности волатильности цен на мировом рынке сельскохозяйственных продуктов (на примере какао). *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. 2023; (10): 20–23. EDN ERRJVX

REFERENCES

1. Kim I.R. Trends in the development of the world market of cocoa and chocolate products: problems and prospects in the context of sanctions. *Features of the development of the world economy in modern conditions: reintegration and the new world order. Collection of articles of the interuniversity scientific and practical conference*. Rostov-on-Don: South Russian Institute of Management — branch of RANEP. 2023; 104–111 (in Russian). EDN BQDSFS
2. Gavrilova N.G. Characteristics of price volatility on the world market for agricultural products (the example of cocoa products). *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Economics and Law*. 2023; (10): 20–23 (in Russian). EDN ERRJVX

3. Киселева К.С. Существующие проблемы на рынке какао-бобов. *Финансовое администрирование в современных условиях: новые вызовы и задачи. Материалы II Международной научной конференции*. Владимир: Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. 2024; 409–413. EDN NUOTNA
4. Гаврилова Н.Г. Глобальный экспорт какао-бобов: факторы ценообразования и регулирование отрасли в Африке. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2024; (10–5): 57–63. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.10.05.008>
5. Венедиктова Е.Н., Яковлева А.Я. Анализ рынка молочных какао-напитков в России. *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. LII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО*. СПб.: Национальный исследовательский университет ИТМО. 2023; 2: 196–201. EDN DYGGJV
6. Таранец О.В., Калманович С.А., Вербицкая Е.А., Ковалевская А.А., Илларионова В.В. Маркетинговый анализ российского рынка сахаристых кондитерских изделий. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2023; (5–6): 148–155. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.5-6.23>
7. Рыжакова А.В., Головизнин И.В. Категоризация потребителей шоколада на основании актуальных предпочтений в 2023 году. *Потребительский рынок: проблемы качества и безопасности товаров и услуг. Материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева: Картуш. 2023; 68–71. EDN MFBSUT
8. Ванюкова С.Д., Ушакова Ю.В., Рысмукхамбетова Г.Е. Маркетинговое исследование рынка шоколада в Саратовской области. *Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК региона. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых*. Махачкала: Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова. 2023; 203–207. EDN NKNFLA
9. Dago D.A., Pei Y. Evaluating the Position of Côte d'Ivoire's Cocoa Industry on the Global Production Chain and the Influencing Factors. *Sustainability*. 2025; 17(3): 1013. <https://doi.org/10.3390/su17031013>
10. Özer A.C. (ed.). Impact of Global Issues on International Trade. *IGI Global*. 2021; 291. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8314-2>
11. Olarte-Libreros M.M., Rojas-Mora J.E., Guerrero-Sierra H.F., Niño C., De la Peña N. Effects of International Shocks on Cocoa Global Production. *Economies*. 2025; 13(2): 48. <https://doi.org/10.3390/economies13020048>
12. Asante P.A., Rahn E., Anten N.P.R., Zuidema P.A., Morales A., Rozendaal D.M.A. Climate change impacts on cocoa production in the major producing countries of West and Central Africa by mid-century. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2025; 362: 110393. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110393>
13. Effah D., Bai C., Asante W.A., Quayson M. The Role of Artificial Intelligence in Coping With Extreme Weather-Induced Cocoa Supply Chain Risks. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2024; 71: 9854–9875. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3289258>
14. Вякина И.В. Санкции как проявление системного кризиса, связанного с фазовой структурной перестройкой мировой экономики и геополитики. *Вестник евразийской науки*. 2024; 16(6). EDN CISTFI
15. Ярашева А.В., Макаров С.В., Алипперова Н.В. Современные здоровьесберегающие практики россиян. *Народонаселение*. 2023; 26(2): 127–138. <https://doi.org/10.19181/population.2023.26.2.11>
16. Седова И.Б., Киселева М.Г., Чалый З.А., Ефимочкина Н.Р., Тутельян В.А. Микотоксины в какао-продуктах и плодах рожкового дерева (кэроба), реализуемых на российском рынке. *Вопросы питания*. 2022; 91(5): 65–77. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-65-77>

ОБ АВТОРАХ

Светлана Владимировна Макаров

доктор экономических наук, главный научный сотрудник
svetwn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1681-8814>

Астхик Аркадьевна Хачатрян

научный сотрудник
aahachatryan@fa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6493-680X>

Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации,
Тверская ул., 22Б, стр. 3, Москва, 125375, Россия

3. Kiseleva K.S. Existing problems in the cocoa bean market. *Financial administration in modern conditions: new challenges and tasks. Materials II International Scientific Conference*. Vladimir: Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. 2024; 409–413 (in Russian). EDN NUOTNA

4. Gavrilova N.G. Global cocoa bean exports: pricing factors and industry regulation in Africa. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2024; (10–5): 57–63 (in Russian). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.10.05.008>

5. Venediktova E.N., Yakovleva A.Ya. Analysis of the market of milk cocoa drinks in Russia. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University. LII scientific and educational and methodical conference of ITMO University*. St. Petersburg: ITMO National Research University. 2023; 2: 196–201 (in Russian). EDN DYGGJV

6. Taranets O.V., Kalmanovich S.A., Verbitskaya E.A., Kovalevskaya A.A., Illarionova V.V. Marketing analysis of the Russian market of sugar confectionery. *News of universities. Food Technology*. 2023; (5–6): 148–155 (in Russian). <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.5-6.23>

7. Ryzhakova A.V., Goloviznin I.V. Categorization of chocolate consumers based on current preferences in 2023. *Consumer market: problems of quality and safety of goods and services. Proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev: Kartush. 2023; 68–71 (in Russian). EDN MFBSUT

8. Vanyukova S.D., Ushakova Yu.V., Rysmukhambetova G.E. Marketing research of the chocolate market in the Saratov region. *The contribution of young scientists to the innovative development of the agro-industrial complex of the region. Proceedings of the VII All-Russian scientific and practical conference of students, masters, postgraduates and young scientists*. Makhachkala: Dagestan State Agricultural University named after M.M. Dzhambulatov. 2023; 203–207 (in Russian). EDN NKNFLA

9. Dago D.A., Pei Y. Evaluating the Position of Côte d'Ivoire's Cocoa Industry on the Global Production Chain and the Influencing Factors. *Sustainability*. 2025; 17(3): 1013. <https://doi.org/10.3390/su17031013>

10. Özer A.C. (ed.). Impact of Global Issues on International Trade. *IGI Global*. 2021; 291. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8314-2>

11. Olarte-Libreros M.M., Rojas-Mora J.E., Guerrero-Sierra H.F., Niño C., De la Peña N. Effects of International Shocks on Cocoa Global Production. *Economies*. 2025; 13(2): 48. <https://doi.org/10.3390/economies13020048>

12. Asante P.A., Rahn E., Anten N.P.R., Zuidema P.A., Morales A., Rozendaal D.M.A. Climate change impacts on cocoa production in the major producing countries of West and Central Africa by mid-century. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2025; 362: 110393. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110393>

13. Effah D., Bai C., Asante W.A., Quayson M. The Role of Artificial Intelligence in Coping With Extreme Weather-Induced Cocoa Supply Chain Risks. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2024; 71: 9854–9875. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3289258>

14. Vyakina I.V. Sanctions as a consequence of a systemic crisis occurring in connection with the phased restructuring of the global economy and geopolitics. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(6) (in Russian). EDN CISTFI

15. Yarasheva A.V., Makar S.V., Alikperova N.V. Modern health-saving practices of Russians. *Population*. 2023; 26(2): 127–138 (in Russian). <https://doi.org/10.19181/population.2023.26.2.11>

16. Sedova I.B., Kiseleva M.G., Chalyy Z.A., Efimochkina N.R., Tutelyan V.A. Mycotoxins contamination of cocoa products and carob marketed in the Russian Federation. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2022; 91(5): 65–77 (in Russian). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-65-77>

ABOUT THE AUTHORS

Svetlana Vladimirovna Makar

Doctor of Economics, Chief Researcher at the Institute
svetwn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1681-8814>

Astghik Arkadyevna Khachatryan

Researcher
aahachatryan@fa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6493-680X>

Financial University under
the Government of the Russian Federation,
22B/3 Tverskaya St., Moscow, 125375, Russia



КОКЦИДИОЗ ПОД КОНТРОЛЕМ!

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ОТ ГК ВИК
ПОД КЛЮЧ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВАШЕГО ПОГОЛОВЬЯ

ШИРОКАЯ ЛИНЕЙКА КОКЦИДИОСТАТИКОВ

ИОНОФОРНЫЕ

- Цикоцин 120, 200 (салиномицин 12% и 20%)
- Мадикокс (мадурамицин 1%)
- Моненза моно (монензин 20%)

ХИМИЧЕСКИЕ

- Карбококси 25 (никарбазин 25%)
- Кокцинат (декоквинат 6%)
- Кокцикларил (диклазурил 0,5%)
- Рококса (робенидин 6,6%)

КОМБИНИРОВАННЫЕ

- Моненза (никарбазин 8% + монензин 8%)
- Макомби (никарбазин 8% + мадурамицин 0,75%)



ЛИНЕЙКА
КОКЦИДИОСТАТИКОВ

- Оптимальные физические свойства микрогранул с учетом передового опыта глобальных производителей
- Гарантия качества и безопасности готовой продукции
- Производство по стандартам GMP на уникальном высокотехнологичном оборудовании
- Отечественное производство мирового класса, гарантия стабильных поставок в необходимых объемах
- Полный цикл экспертной поддержки



МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЕТЕРИНАРНЫЙ КОНГРЕСС

MMBK 2026

8-10 апреля 2026

7 апреля 2026
(предконгрессный день)

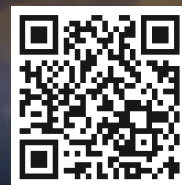
**ИЦ Сколково,
Технопарк**

ОБУЧЕНИЕ ОТДЫХ ОБЩЕНИЕ

www.vetcongress.ru

infosupport@vetcongress.ru

+7 (495) 989 44 60



Реклама

ЦЕНТР ИЗУЧЕНИЯ
ПИТАНИЯ
И БЛАГОПОЛУЧИЯ
ЖИВОТНЫХ

part+ners

ВЕТПРОМ

VetCareer.
Найди свою работу в ветеринарии

ВЕТБИОХИМ

NITA-FARM
ветеринарные препараты

Валта
пет продукты

МИРАЛЕК

VIC
ГРУППА
КОМПАНИЙ
ВИК

KRKA

экопром
движение к лучшему

AVZ
ветеринарные препараты

apicenna
ветеринарные препараты

АГРОБИОПРОМ

PROMOMED
ветеринарные препараты

Farmina
Happy pet, happy you

**VET
STEM**

МОСЗООВЕТНАБ
ветеринарные препараты

АКВАТРА

**BEST
DINNER**

SonoScape

АЛТАНОВА

**LIMKORM
GROUP**

GRANDORF VET