

научно-теоретический и производственный журнал

АГРАРНАЯ НАУКА

AGRARIAN
SCIENCE

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

11
2025



БЕСПЛАТНО
скачать журнал
и подписаться



Подпишитесь
на наш
Telegram канал!



ЗООТЕХНИЯ

Оценка генетического разнообразия
популяций северных оленей:
крупномасштабный скрининг
полиморфизмов гена миостатина

54

АГРОНОМИЯ

Современные тенденции
в исследованиях и технологиях
применения аттрактантов для
мониторинга вредных чешуекрылых

122

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методы определения
полициклических ароматических
углеводородов в молоке и
молочных продуктах

167



ПАРОМОФОР 70

Лучший выбор для профилактики
и лечения криптоспориديоза у телят

ПАРОМОФОР 70 – эффективное средство
против криптоспориديоза у телят:
способствует повышению сохранности
и увеличению привесов

Доказанное действие на **Cryptosporidium spp.**,
а также **Escherichia coli**, **Salmonella spp.**

Экономически выгодное лечение: **стоимость
курса до 35% ниже**, чем у конкурентов

Не влияет на вкус молока и легко растворяется,
что упрощает его использование,
экономит время и трудозатраты

Удобная дозировка для индивидуального
и группового применения

Высокая эффективность
подтвержденная опытами

Высокие стандарты производства
по технологии глобальных фармацевтических
производителей



Узнать больше
о продукте >>



Реклама

+7 (495) 777-67-67

www.vicgroup.ru

© 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 17.11.2025

Дата выхода в свет 24.11.2025

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.

Омбаев А.М., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, иностранный член РАН, Казахский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства, г. Алматы, Казахстан.

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, Прикаспийский зональный научно-исследовательский ветеринарный институт, г. Махачкала, Россия.

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

Баймуканов Д.А., доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Казахский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства, г. Алматы, Казахстан.

Булашев А.К., доктор ветеринарных наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина, г. Астана, Казахстан.

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.

Карынбаев А.К., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Таразский университет им. М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан.

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.

Кривоногова А.С., доктор биологических наук, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН (Уральский научно-исследовательский ветеринарный институт), г. Екатеринбург, Россия.

Кушалиев К.Ж., доктор ветеринарных наук, профессор, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, г. Уральск, Казахстан.

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

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

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.

Лысенко Ю.А., доктор биологических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
Миколойчик И.Н., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Курганский государственный университет, г. Курган, Россия.
Миронова И.В., доктор биологических наук, профессор, Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия.
Морозова Л.А., доктор биологических наук, профессор, Курганский государственный университет, г. Курган, 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.
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.
Щербаков П.Н., доктор ветеринарных наук, доцент, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия.

АГРОНОМИЯ

РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНЫЙ СОВЕТ:

Годсвилл Н.Н., PhD, Университет Яунде I, г. Яунде, Камерун.

Джурраев 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.

Джалилов Ф.С., доктор биологических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, 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.

Дарвиш А.М.Г., PhD, Город научных исследований и технологических приложений, г. Александрия, Египет.

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

Дидманидзе О.Н., доктор технических наук, профессор, академик РАН, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Шехата М.Г.М., PhD, Город научных исследований и технологических приложений, г. Каир, Египет.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Брюханов 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.

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

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

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

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

Мамедов Г.Б., доктор технических наук, профессор, Азербайджанский государственный аграрный университет, г. Гянджа, Азербайджан.

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

Семёнова 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, Москва, Россия.

Суйчинов А.К., PhD, Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности, г. Алматы, Казахстан.

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.

Эль-Сохайми С.А., PhD, профессор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, 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.

Киреева А.А., кандидат экономических наук, Институт экономики, г. Алматы, Казахстан.

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.

Рахметова Р.У., доктор экономических наук, профессор, Университет Туран, г. Астана, Казахстан.



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 Str., 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 17.11.2025

Release date 24.11.2025

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

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.

Ombaev A.M., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Foreign Member of the Russian Academy of Sciences, Kazakh Research Institute of Animal Husbandry and Forage Production, Almaty, Kazakhstan.

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.

Baimukanov D.A., Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Kazakh Research Institute of Animal Husbandry and Feed Production, Corresponding member of National Academy of Sciences, Almaty, Kazakhstan.

Bulashev A.K., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan.

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.

Karynbaev A.K., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan.

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.

Krivorogova A.S., Doctor of Biological Sciences, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ural Veterinary Research Institute), Yekaterinburg, Russia.

Kushaliev K.Zh., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Zhanger Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan.

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

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

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

Mikolaichik I.N., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Kurgan State University, Kurgan, Russia.

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

Morozova L.A., Doctor of Biological Sciences, Professor, Kurgan State University, Kurgan, 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.

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.

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.

AGRONOMY

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

Godswill N.N., PhD, University of Yaoundé I, Yaounde, Cameroon.
Juraev M.Ya., PhD, Associate Professor, Andijan Institute of Agriculture and Agrotechnologies, Andijan, Uzbekistan.
Nasiev B.N., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Zhangir khan West Kazakhstan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan.
Thiruvengadam M., PhD, Konkuk University, Seoul, South Korea.

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Bunin M.S., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Central Scientific Agricultural Library, Moscow, Russia.
Dolzhenko T.V., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Saint-Petersburg state agrarian university, Pushkin, St. Petersburg, Russia.
Dragavtseva I.A., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, North Caucasian Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture and Winemaking, Krasnodar, Russia.
Grichanov I.Ya., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, All-Russian Research Institute of Plant Protection, Pushkin, Russia.
Islamgulov D.R., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.
Jalilov F.S., Doctor of Biological Sciences, Professor, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.
Kalmykova E.V., Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Aforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia.
Kazakhmedov R.E., Doctor of Biological Sciences, North Caucasian Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, Winemaking, Derbent, Russia.
Nikitin S.N., Doctor of Agricultural Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture named after N. S. Nemtsev, Ulyanovsk, Russia.
Zeynalov A.S., Doctor of Biological Sciences, Federal Scientific Selection and Technological Center for Horticulture and Nursery, Moscow, Russia.

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

Afrasyab Kh., Doctor of Fluid Mechanics and Fluid engineering Machinery, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia.
Darwish A.M.G., PhD, City of Scientific Research and Technological Applications, Alexandria, Egypt.
de Souza K.C., PhD, Blumenau Regional University, Blumenau, Brazil.
Didmanidze O.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia.
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. Gorbatov 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.
Shehata M.G.M., PhD, City of Scientific Research and Technological Applications, Cairo, Egypt.
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:

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.
El-Sohaimy S.A., PhD, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, 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.
Semyonova A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, V.M. Gorbatov 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.
Kireeva A.A., Candidate of Economic Sciences, Institute of Economics, Almaty, Kazakhstan.
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.
Ramazanov I.A., Doctor of Economics, Associate Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА

Ребезов М.Б., Виолин Б.В., Ребезов Я.М. Публикационная активность в инфографике (часть 6-я): сравнительный анализ за двухлетний период (2023 и 2024 гг.)	8
--	---

ВЕТЕРИНАРИЯ

Ахунова А.Р., Галеева А.Г., Яруллин А.И., Ефимова М.А., Мингалеев Д.Н., Равилов Р.Х. Выделение и очистка рекомбинантного гексона бычьего аденовируса 3-го типа	15
Севастьянова Т.В., Уша Б.В., Носков С.Б., Альшевская А.А. Влияние функциональных таргетных пробиотиков на показатели неспецифической резистентности молодняка сельскохозяйственных животных	22
Топурия Г.М. Влияние препарата «Асид Лак» на состояние естественной резистентности организма цыплят-бройлеров	33

ЗООТЕХНИЯ

Ребезов Я.М., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Хайбрахманов Р.Р. Положение российского индейководства в 2025 году	40
Митяшова О.С., Лебедева И.Ю. Стероидогенная активность яичников коров в зависимости от результативности искусственного осеменения и полиморфизма гена <i>DIO1</i>	48
Харзинова В.Р., Чурбакова Н.А. Оценка генетического разнообразия популяций северных оленей (<i>Rangifer tarandus</i>): крупномасштабный скрининг полиморфизмов гена миостатина	54
Бахтыбеккызы Ш., Мусаева А.С., Оразымбетова З.С., Арынгазиев Б.С., Алаева С.А., Бекитаева А.К., Омашев К.Б., Сагдат Е., Малмаков Н.И. Исследование полиморфизма генов <i>CAST</i> и <i>GH</i> у казахских курдючных грубошерстных овец	60
Волкова Н.А., Ветох А.Н., Волкова Л.А. Идентификация SNP и генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек на основе данных полногеномного генотипирования	68
Белокурова С.С., Чинаров Р.Ю., Луканина В.А., Сингина Г.Н. Влияние различных временных режимов проведения сеансов ОРУ на развитие овариальных фолликулов у тёлочек сычёвской породы	76
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	83

АГРОНОМИЯ

Рожмина Т.А., Мясникова А.В., Пролётова Н.В. Источники вертикальной устойчивости льна масличного к фузариозному увяданию	91
Козьякова Н.Н. Эффективность методов отбора исходного материала по качеству семян льна-долгунца в первичном семеноводстве	98
Бударина В.С., Асташов А.Н., Асташова Т.В., Пронудин К.А., Бабушкин Д.Д. Биоэнергетическая эффективность короткоротационных севооборотов с включением позднеспелых культур в условиях аридного климата Нижнего Поволжья	105
Горюнов К.Н., Регидин А.А., Кравченко Н.С. Изучение хозяйственно ценных признаков образцов коллекционного питомника люцерны в условиях Ростовской области	113
Крохалев Р.С., Гричанов И.Я. Современные тенденции в исследованиях и технологиях применения аттрактантов для мониторинга вредных чешуекрылых	122
Сучкова С.А., Михайлова С.И., Абзалтденов Т.З. Опыт возделывания горца Вейриха в условиях длительной интродукции в Сибирском ботаническом саду	131

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тарасова С.В., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Иванов П.А., Нейфельд Е.В., Ротова В.А. Метод расчета частот и форм собственных колебаний 14-массовой крутильно-колебательной системы мобильного энергетического средства с орудием при выполнении технологических операций на склоне	138
Кузнецов П.Н., Евстигнеев В.П., Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю. Разработка и валидация алгоритма коррекции температурных измерений в условиях интенсивной инсоляции	144
Kuznetsova E.A., Rebezov M.B., Bondarev N.I., Lkhagvadolgor D. Development of an innovative starter culture for use in whole grain bread technology	159
Лукин А.А., Кан О.П. Методы определения полициклических ароматических углеводородов в молоке и молочных продуктах	167
Рождественская Л.Н. Здоровое устойчивое питание как драйвер трансформации продовольственных систем	187

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Тищенко Е.С., Клейменова Ю.А., Кравченко Е.С. Комплексный анализ использования ресурсного потенциала агропромышленного предприятия на основе цифровых инструментов бизнес-анализа	198
---	-----

АГРОЭКОСИСТЕМЫ

Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В. Адаптация газодинамических защитных технологий для минимизации аэротехногенного загрязнения агроэкосистем.	209
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Паршутин Л.А., Рыжова О.Н. Педагогические кадры для сельских школ по естественно-научным дисциплинам: современные решения	215
---	-----

CONTENTS

EDITOR'S COLUMN

<i>Rebezov M.B., Violin B.V., Rebezov Ya.M.</i> Publication activity in infographics (Part 6): comparative analysis over a two-year period (2023 and 2024)	8
--	---

VETERINARY MEDICINE

<i>Akhunova A.R., Galeeva A.G., Yarullin A.I., Efimova M.A., Mingaleev D.N., Ravilov R.Kh.</i> Isolation and purification of recombinant bovine adenovirus type 3 hexone	15
<i>Sevastyanova T.V., Usha B.V., Noskov S.B., Alshevskaya A.A.</i> The effect of functional targeted probiotics on the indicators of nonspecific resistance in young farm animals	22
<i>Topuria G.M.</i> The influence of the drug Acid Lac on the state of natural resistance of the body of broiler chickens	33

ZOOTECHNICS

<i>Rebezov Ya.M., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Khaibrakhmanov R.R.</i> The state of Russian turkey farming in 2025	40
<i>Mityashova O.S., Lebedeva I.Yu.</i> Steroidogenic activity of bovine ovaries depending on the effectiveness of artificial insemination and <i>DIO1</i> gene polymorphism	48
<i>Kharzinova V.R., Churbakova N.A.</i> Assessing genetic diversity in reindeer (<i>Rangifer tarandus</i>) populations: a large-scale screening of myostatin gene polymorphisms	54
<i>Bakhtybekkyzy Sh., Mussayeva A.S., Orazymbetova Z.S., Aryngazyev B.S., Alayeva S.A., Bekitayeva A.K., Omashev K.B., Sagdat E., Malmakov N.I.</i> Study of <i>CAST</i> and <i>GH</i> gene polymorphisms in kazakh fat-tailed sheep	60
<i>Volkova N.A., Vetokh A.N., Volkova L.A.</i> Identification of SNPs and candidate genes associated with first egg weight in laying hens based on whole-genome genotyping data	68
<i>Belokurova S.S., Chinarov R.Yu., Lukanina V.A., Singina G.N.</i> The influence of different time modes of OPU sessions on the development of ovarian follicles in heifers of the Sychev breed.	76
<i>Dzhulamanov K.M., Gerasimov N.P., Safronova A.A.</i> 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	83

AGRONOMY

<i>Rozhmina T.A., Myasnikova A.V., Proletova N.V.</i> Sources of vertical resistance of flaxseed to fusarium wilt	91
<i>Kozyakova N.N.</i> The effectiveness of the methods of selecting the source material for the quality of flax seeds in primary seed production	98
<i>Budarina V.S., Astashov A.N., Astashova T.V., Pronudin K.A., Babushkin D.D.</i> Bioenergetic efficiency of short-term crop rotations with the inclusion of late-ripening crops in the arid climate of the Lower Volga region	105
<i>Goryunov K.N., Regidin A.A., Kravchenko N.S.</i> Study of economically valuable traits of alfalfa collection nursery samples in the Rostov region	113
<i>Krokhaliev R.S., Grichanov I.Ya.</i> Current trends in attractant research and their application technologies for monitoring harmful lepidopterans	122
<i>Suchkova S.A., Mikhailova S.I., Abzaltdenov T.Z.</i> The experience of cultivating <i>Polygonum weyrichii</i> under conditions of long-term introduction in the Siberian Botanical Garden.....	131

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Tarasova S.V., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Ivanov P.A., Neifeld E.V., Rotova V.A.</i> A method for calculating the frequencies and forms of natural vibrations of a 14-mass torsion-oscillating system of a mobile power tool with a tool when performing technological operations on a slope	138
<i>Kuznetsov P.N., Evstigneev V.P., Kotelnikov D.Yu., Voronin D.Yu.</i> Development and validation of a temperature measurement correction algorithm under intensive solar radiation conditions	144
<i>Kuznetsova E.A., Rebezov M.B., Bondarev N.I., Lkhagvadolgor D.</i> Development of an innovative starter culture for use in whole grain bread technology	159
<i>Lukin A.A., Can Ö.P.</i> Methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products.....	167
<i>Rozhdestvenskaya L.N.</i> Healthy Sustainable Nutrition as a Driver of Transformation of Food Systems	187

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

<i>Tishchenko E.S., Kleimenova J.A., Kravchenko E.S.</i> Comprehensive analysis of the use of the resource potential of an agro-industrial enterprise based on digital business analysis tools	198
--	-----

AGROECOSYSTEMS

<i>Yarygin V.N., Prikhodko V.G., Yarygin I.V.</i> Adaptation of gas-dynamic protective technologies to minimize aerotechnogenic pollution of agroecosystems.	209
---	-----

PERSONNEL TRAINING

<i>Parshutina L.A., Ryzhova O.N.</i> Teaching staff for rural schools in natural sciences: modern solutions.....	215
--	-----

УДК: 002.63

Краткое сообщение



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-8-14

М.Б. Ребезов^{1,2}

Б.В. Виолин³ ✉

Я.М. Ребезов⁴

¹Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

²Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии — филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко Российской академии наук», Москва, Россия

⁴Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Новгород, Россия

✉ agrovetpress@inbox.ru

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Ребезов М.Б., Виолин Б.В., Ребезов Я.М.

Short communications



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-8-14

Maksim B. Rebezov^{1,2}

Boris V. Violin³ ✉

Yaroslav M. Rebezov⁴

¹Gorbatov Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

²Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

³All-Russian Scientific Research Institute for Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plant — a branch of the Federal Scientific Centre VIEV, Moscow, Russia

⁴Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

✉ agrovetpress@inbox.ru

Received by the editorial office: 01.10.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Rebezov M.B., Violin B.V., Rebezov Ya.M.

Публикационная активность в инфографике (часть 6-я): сравнительный анализ за двухлетний период (2023 и 2024 гг.)

РЕЗЮМЕ

Представлен сравнительный анализ публикационной активности и наукометрических показателей журнала «Аграрная наука» за двухлетний период (2023 и 2024 гг.). Исследование выполнено на основе данных научной базы данных eLibrary.Ru. Проанализированы ключевые индикаторы: позиция в рейтинге Science Index, количество опубликованных статей, цитируемость в РИНЦ и его ядре, двухлетний и пятилетний импакт-факторы, а также средний объем статей и среднее количество ссылок на публикацию. Результаты исследования демонстрируют положительную динамику по большинству показателей. В частности, отмечены рост рейтингового показателя Science Index с 6,07 до 6,12, увеличение количества статей (с 248 до 268) и цитирований, а также улучшение значений импакт-факторов. Журнал сохраняет сильные позиции в референтных группах, входя в лучшие 25% журналов по версии Перечня ВАК (2-я категория) и в лучшие 50% по другим значимым спискам.

Проведенный анализ подтверждает устойчивое развитие и рост влияния журнала «Аграрная наука» в научном сообществе.

Ключевые слова: публикационная активность журнала, научные издания, научные публикации, статистический анализ, РИНЦ, Двухлетний импакт-фактор, Пятилетний импакт-фактор, рейтинг Science Index, Процентиль журнала

Для цитирования: Ребезов М.Б., Виолин Б.В., Ребезов Я.М. Публикационная активность в инфографике (часть 6-я): сравнительный анализ за двухлетний период (2023 и 2024 гг.). *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 8–14. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-8-14>

Publication Activity in Infographics (Part 6): A Comparative Analysis of a Two-Year Period (2023 and 2024)

ABSTRACT

A comparative analysis of the publication activity and scientometric indicators of the journal "Agrarian Science" over a two-year period (2023 and 2024) is presented. The study was conducted based on data from the scientific database eLibrary.Ru. Key indicators were analyzed: position in the Science Index ranking, number of published articles, citations in the Russian Science Citation Index (RSCI) and its core, two-year and five-year impact factors, as well as the average article length and number of references per publication.

The research results demonstrate positive dynamics for the majority of indicators. In particular, an increase in the Science Index rating from 6.07 to 6.12 was noted, along with a growth in the number of articles (from 248 to 268) and citations, as well as an improvement in impact factor values. The journal maintains strong positions in reference groups, being among the top 25% of journals according to the List of the Higher Attestation Commission (HAC, category 2) and the top 50% in other significant lists.

The conducted analysis confirms the sustainable development and growing influence of the "Agrarian Science" journal within the scientific community.

Key words: publication activity of the journal, editorial policy, scientific publications, scientific publications, statistical analysis, RSCI, Two-Year Impact Factor, Five-Year Impact Factor, Science Index Ranking, Journal Percentile

For citation: Rebezov M.B., Violin B.V., Rebezov Ya.M. Publication activity in infographics (Part 6): comparative analysis over a two-year period (2023 and 2024). *Agrarian science*. 2025; 400(11): 8–14 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-8-14>

Введение/Introduction

Рецензируемый научно-теоретический журнал «Аграрная наука»¹ (далее — журнал) публикует результаты научно-исследовательской и научно-практической деятельности ученых, научных сотрудников вузов, научных организаций, аспирантов и специалистов промышленных предприятий.

Журнал 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 (К1, К2), в список периодических изданий Международной базы данных AGRIS², в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в ядро РИНЦ, RSCI³, «Белый список»⁴.

Продолжаем цикл публикаций по оценке публикационной активности и рейтингов журнала [1–5]. Для оценки научных журналов используют различные методики⁵ и программы^{6–8}, например подсчет цитирований, расчет импакт-фактора, оценку по рейтингу журналов [6–10].

Авторами выполнен анализ публикационной активности журнала с 2023 по 2024 г. по материалам, представленным в научной электронной библиотеке eLibrary.Ru⁹.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Объект исследования — публикационная активность и ранжирование журнала. Предмет исследования — массив данных, представленных в издании в сравнении за 2023 г. и 2024 г.

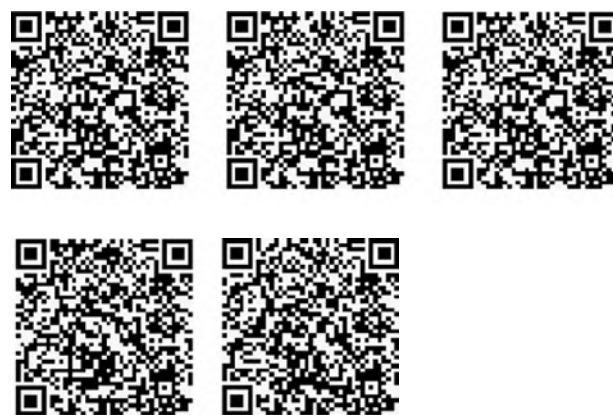
Материалом для исследования являлись статистические данные, представленные в научной электронной библиотеке eLibrary.Ru⁵. Полученные данные анализировались с применением проблемно-тематического и системного анализа.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Ранжирование журналов в рейтинге Science Index осуществляется на основе показателя, рассчитываемого по специальной методике¹⁰, учитывающей тематическое направление журнала, уровень самоцитирования и другие факторы.

Хронологическое распределение индикаторных показателей журнала представлено на рисунках 1–5.

Продолжаем цикл публикаций в журнале по теме «Публикационная активность в инфографике». Ознакомиться с ранее опубликованными материалами возможно по следующим QR кодам:



¹ <https://www.vetpress.ru/jour>

² <https://agris.fao.org/>

³ Совместный проект Российской академии наук, компаний Clarivate Analytics и Научная электронная библиотека eLibrary.Ru — коллекция лучших российских журналов на платформе Web of Science. https://elibrary.ru/project_rsci.asp

⁴ Сведения о журналах, включенных в актуальную версию «Белого списка» (протоколы заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов от 11.07.2024 № ДС/25-пр, от 15.05.2023 № ДС/17-пр, от 20.10.2022 № ДА/3855-пр). <https://journalrank.rcsi.science/ru/>

⁵ Итоги оценки и рейтингования научных журналов, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в 2024 году / И.Е. Ильина, Н.Н. Гагиев, С.И. Пахомов и др. М.: IMG Print, 2024; 36. ISBN 978-5-605-16344-2. EDN VWRNPN

⁶ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664154 Российская Федерация. Программа для определения показателей журналов из различных наукометрических баз данных: заявл. 19.05.2025; опубл. 03.06.2025 / Е.Ю. Кротов. EDN XAIUDN

⁷ Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620852 Российская Федерация. Russian Science Citation Index (RSCI): № 2023623701: заявл. 02.11.2023; опубл. 21.02.2024 / Г.О. Еременко; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научная электронная библиотека». EDN QKGWNY

⁸ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613313 Российская Федерация. Программа для автоматизированного сбора метаданных научных журналов: заявл. 22.01.2025; опубл. 10.02.2025 / Н.В. Бабырь, Е.В. Григорьев, С.В. Синявина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». EDN IVNLFA

⁹ <https://www.elibrary.ru/defaulttx.asp>

¹⁰ При расчете рейтинга используются следующие библиометрические показатели: IF5 — нормированный импакт-фактор журнала по ядру РИНЦ за 5 лет (среднее число цитирований из журналов ядра РИНЦ в расчетном году на статьи в журнале за 5 предыдущих расчетному году лет); H10 — нормированный индекс Хирша по ядру РИНЦ статей в журнале за последние 10 лет; HA3 — средний нормированный индекс Хирша по ядру РИНЦ авторов статей в журнале за последние 3 года (рассчитывается постатейно); LN3 — средняя длина текста статей за последние 3 года. Показатели нормализуются путем деления на максимальное значение в выборке. Интегральный показатель журнала в системе Science Index рассчитывается по формуле: $SI = 8 * IF5 + 7 * H10 + 4 * HA3 + 4 * LN3$.

Рис. 1. Ранжирование журнала «Аграрная наука» в рейтинге Science Index

Fig. 1. Ranking of the journal "Agrarian Science" in the Science Index rating



Рис. 2. Количество опубликованных статей в журнале «Аграрная наука» и цитирований в РИНЦ

Fig. 2. Number of published articles in the journal "Agrarian Science" and citations in the Russian Science Citation Index



Ранжирование журнала в рейтинге Science Index представлено на рисунке 1.

Анализируя данные, представленные на рисунке 1, отмечаем улучшения показателей журнала за двухлетний период — с 2023 по 2024 г.: процентиль журнала снизился с 23 до 22¹³; рейтинг журнала в Science Index повысился с 6,07 до 6,12; место журнала в рейтинге Science Index изменилось — повысилось с 1035 до 966.

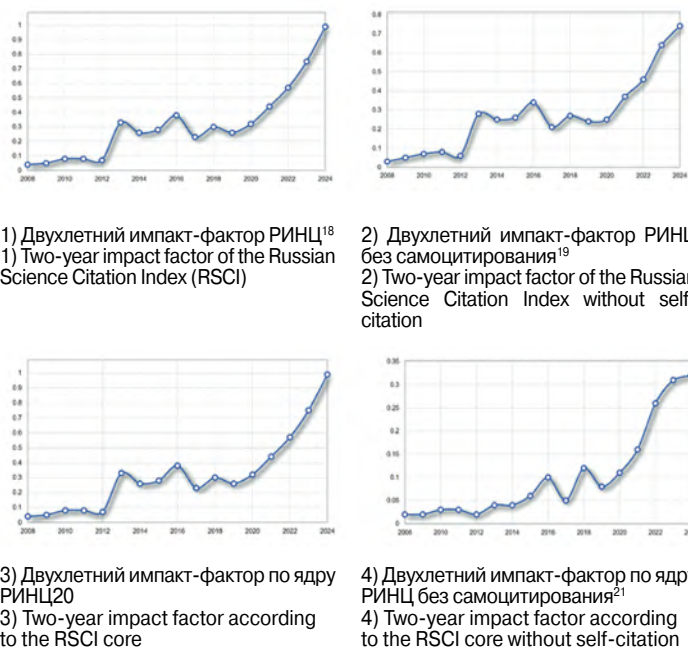
Количество опубликованных статей в журнале и цитирований в РИНЦ¹⁴ представлено на рисунке 2.

Анализируя данные (рис. 2), отмечаем значительное улучшение показателей журнала за двухлетний период — с 2023 до 2024 г.: число опубликованных статей увеличилось с 248 до 268; число цитирований из РИНЦ увеличилось с 921 до 1141; число цитирований из ядра РИНЦ увеличилось с 435 до 636.

Инфографика двухлетнего импакт-фактора РИНЦ журнала представлена на рисунке 3.

Рис. 3. Двухлетний импакт-фактор РИНЦ (RSCI) журнала «Аграрная наука»

Fig. 3. Two-year impact factor of the Russian Science Citation Index (RSCI) of the journal "Agrarian Science"



¹¹ Процентиль журнала может принимать значения от 1 до 100.

¹² Ранжирование журналов в рейтинге Science Index осуществляется на основе показателя, рассчитываемого по специальной методике, учитывающей тематическое направление журнала, уровень самоцитирования и другие факторы.

¹³ Чем меньше это значение, тем выше место журнала в этом рейтинге.

¹⁴ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) — это национальная библиографическая база данных научного цитирования.

¹⁵ Число статей, опубликованных в журнале за год (учитываются только научные статьи, обзоры и краткие сообщения).

¹⁶ Суммарное количество ссылок на все статьи журнала за все годы, сделанных в публикациях РИНЦ данного года, в том числе из этого же журнала.

¹⁷ Суммарное количество ссылок на все статьи журнала за все годы, сделанных в публикациях ядра РИНЦ данного года, в том числе из этого же журнала.

¹⁸ Число цитирований в текущем году статей, опубликованных в журнале за предыдущие два года, поделенное на число этих статей (учитывается самоцитирование).

¹⁹ Число ссылок в текущем году из других журналов на статьи в журнале, опубликованные за предыдущие два года, поделенное на число этих статей.

²⁰ Число цитирований в текущем году статей, опубликованных в журнале за предыдущие два года, поделенное на число этих статей. При этом учитываются ссылки только из журналов, входящих в ядро РИНЦ (то есть включенных в WoS, Scopus или RSCI). Учитывается самоцитирование.

²¹ Число ссылок в текущем году из других журналов на статьи в журнале, опубликованные за предыдущие два года, поделенное на число этих статей. Учитываются ссылки только из журналов, входящих в ядро РИНЦ (то есть включенных в WoS, Scopus или RSCI).

Анализируя данные, представленные на рисунке 3, отмечаем улучшения показателей журнала за двухлетний период — с 2023 до 2024 г.: повысился показатель «Двухлетний импакт-фактор РИНЦ» — с 0,75 до 0,99; повысился показатель «Двухлетний импакт-фактор РИНЦ без самоцитирования» — с 0,64 до 0,74; повысился показатель «Двухлетний импакт-фактор по ядру РИНЦ» — с 0,42 до 0,57; повысился показатель «Двухлетний импакт-фактор по ядру РИНЦ без самоцитирования» — с 0,31 до 0,32.

На рисунке 4 представлена информация с 2008 по 2024 г. показателя «Средняя длина текста статьи».

Анализируя данные журнала за 2023 г. и 2024 г., представленные на рисунке 4, отмечаем улучшение показателя «Среднее число символов в текстах статей» — с 13 705 до 14 827.

Хронологическое распределение среднего количества ссылок в одной статье²² журнала представлено на рисунке 5.

Анализируя данные журнала (рис. 5), отмечаем значительное улучшение показателя «Среднее число ссылок в одной статье» за двухлетний период (2023–2024 гг.) — с 17,69 до 20,09.

Индикаторы публикационной активности представлены на рисунках 6–9.

Показатели публикационной активности журнала могут быть сопоставлены с соответствующими значениями показателей других журналов в пределах выбранной референтной группы. Причем можно выбрать не только референтную группу, в которую данный журнал входит, но и любую другую.

Все журналы из референтной группы сортируются в порядке улучшения соответствующего показателя. Место данного журнала в этой последовательности отмечается оранжевым указателем на линейных индикаторах, стрелкой — на стрелочных индикаторах.

Шкалы индикаторов поделены на четыре равные зоны, которые на линейных индикаторах выделены оттенками серого, а на стрелочных — красным, желтым и зеленым цветами. Нахождение указателя в самой светлой или зеленой зоне означает, что по данному показателю журнал входит в число лучших 25% журналов в данной референтной группе.

Пятилетний импакт-фактор журнала по ядру РИНЦ на линейных индикаторах представлен на рисунке 6.

Сравнивая данные показателей журнала, представленные на рисунке 6, отмечаем, что пятилетний импакт-фактор журнала по ядру РИНЦ увеличился с 0,34 до 0,35 за анализируемый период (2023–2024 гг.).

Отмечаем, что журнал за 2023 г. и 2024 г. находится в наилучшей (самой светлой) зоне по группе

Рис. 4. Среднее число символов в текстах статей текущего года выпуска

Fig. 4. Average number of characters in the texts of articles of the current year of publication



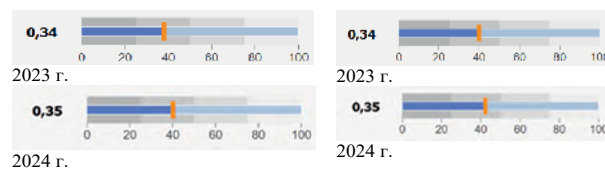
Рис. 5. Среднее число ссылок в одной статье журнала «Аграрная наука»

Fig. 5. Average number of references in one article of the journal «Agrarian Science»



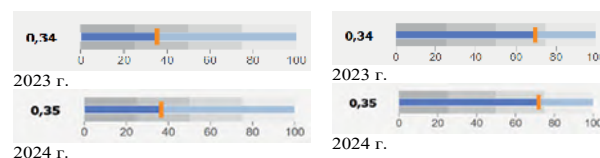
Рис. 6. Пятилетний импакт-фактор журнала «Аграрная наука» по ядру РИНЦ на линейных индикаторах

Fig. 6. Five-year impact factor of the journal «Agrarian Science» based on the RSCI core using linear indicators



1) по группе журналов, входящих в ядро РИНЦ (2023 г. — выборка из 1476 журналов; 2024 г. — выборка из 1518 журналов)²³
1) for a group of journals included in the RSCI (Russian Science Citation Index) core (2023 — a sample of 1476 journals; 2024 — a sample of 1518 journals)

2) по группе журналов, входящих в RSCI (2023 г. — выборка из 1019 журналов; 2024 г. — выборка из 1080 журналов)
2) for the group of journals included in the RSCI (2023 — sample of 1019 journals; 2024 — sample of 1080 journals)



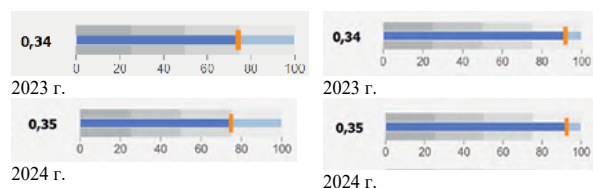
3) по группе журналов, входящих в «Белый список» (2023 г. — выборка из 1335 журналов; 2024 г. — выборка из 1337 журналов)
3) for a group of journals included in the «White List» (2023 — a sample of 1,335 journals; 2024 — a sample of 1,337 journals)

4) по группе журналов, входящих в «Белый список» (4-й уровень) (2023 г. — выборка из 368 журналов; 2024 г. — выборка из 369 журналов)
4) for the group of journals included in the «White List» (level 4) (2023 — sample of 368 journals; 2024 — sample of 369 journals)

²² Среднее число ссылок в списке цитируемой литературы.

²³ Число цитирований в текущем году статей, опубликованных в журнале за предыдущие 5 лет, поделенное на число этих статей. При этом учитываются ссылки только из журналов, входящих в ядро РИНЦ (то есть включенных в WoS, Scopus или RSCI).

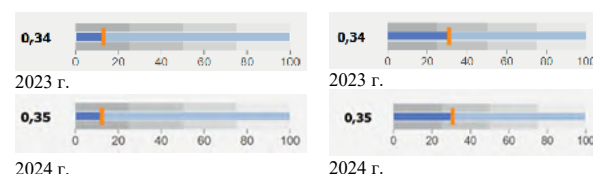
(Продолжение рисунка 6)



5) по группе журналов, входящих в Перечень журналов Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (2023 г. — выборка из 3733 журналов; 2024 г. — выборка из 3725 журналов)

6) по группе журналов, входящих в Перечень ВАК (2-я категория) (2023 г. — выборка из 1482 журналов; 2024 г. — выборка из 1500 журналов)

6) for a group of journals included in the List of journals of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (category 2) (2023 — sample of 1482 journals; 2024 — sample of 1500 journals)



7) по группе российских журналов, входящих в список WOS (квартиль 4) (2023 г. — выборка из 270 журналов; 2024 г. — выборка из 249 журналов)

8) по группе российских журналов, входящих в список Scopus (квартиль 4) (2023 г. — выборка из 304 журналов; 2024 г. — выборка из 330 журналов)

7) for the group of Russian journals included in the WOS list (quartile 4) (2023 — sample of 270 journals; 2024 — sample of 249 journals)

8) for the group of Russian journals included in the Scopus list (quartile 4) (2023 — sample of 304 journals; 2024 — sample of 330 journals)

журналов, входящих в Перечень ВАК (2-я категория). По данному показателю журнал входит в число лучших 25% журналов в данной референтной группе.

Анализируя показатели 2023 г. и 2024 г. (рис. 6), отмечаем, что журнал входит в число лучших 50% журналов в референтных группах: журналов, входящих в Перечень ВАК; российских журналов, входящих в «Белый список» (уровень 4).

Показатель «Двухлетний импакт-фактор журнала по ядру РИНЦ» на линейных индикаторах представлен на рисунке 7.

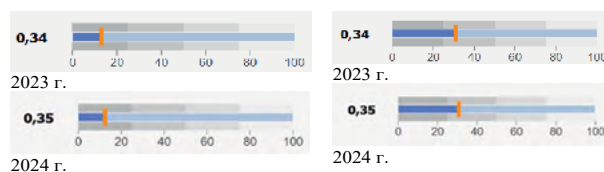
Сравнивая данные показателей журнала, представленные на рисунке 7, отмечаем, что «Двухлетний импакт-фактор журнала по ядру РИНЦ» увеличился с 0,41 до 0,42 за анализируемый период (2023–2024 гг.).

Отмечаем, что журнал за 2023 г. и 2024 г. находится в наилучшей (самой светлой) зоне по группе журналов, входящих в Перечень ВАК и Перечень ВАК (2-я категория). По данному показателю журнал входит в число лучших 25% журналов в данной референтной группе.

Журнал входит в число лучших 50% журналов в референтной группе журналов, входящих в «Белый список» (4-й уровень).

Рис. 7. Двухлетний импакт-фактор журнала «Аграрная наука» по ядру РИНЦ на линейных индикаторах

Fig. 7. Two-year impact factor of the journal based on the RSCI core using linear indicators

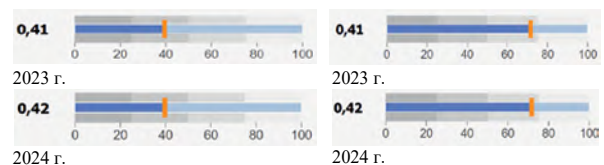


1) по группе журналов, входящих в ядро РИНЦ (2023 г. — выборка из 1476 журналов; 2024 г. — выборка из 1518 журналов)

1) for a group of journals included in the RSCI (Russian Science Citation Index) core (2023 — a sample of 1476 journals; 2024 — a sample of 1518 journals)

2) по группе журналов, входящих в RSCI (2023 г. — выборка из 1019 журналов; 2024 г. — выборка из 1080 журналов)

2) for the group of journals included in the RSCI (2023 — sample of 1019 journals; 2024 — sample of 1080 journals)

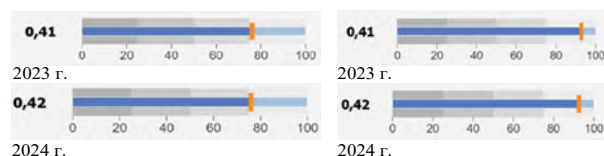


3) по группе журналов, входящих в «Белый список» (2023 г. — выборка из 1335 журналов; 2024 г. — выборка из 1337 журналов)

3) for a group of journals included in the "White List" (2023 — a sample of 1335 journals; 2024 — a sample of 1337 journals)

4) по группе журналов, входящих в «Белый список» (4-й уровень) (2023 г. — выборка из 368 журналов; 2024 г. — выборка из 369 журналов)

4) for the group of journals included in the "White List" (level 4) (2023 — sample of 368 journals; 2024 — sample of 369 journals)

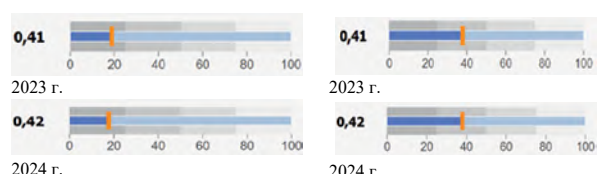


5) по группе журналов, входящих в Перечень журналов Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (2023 г. — выборка из 3733 журналов; 2024 г. — выборка из 3725 журналов)

5) for a group of journals included in the List of journals of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (2023 — a sample of 3733 journals; 2024 — a sample of 3725 journals)

6) по группе журналов, входящих в Перечень ВАК (2-я категория) (2023 г. — выборка из 1482 журналов; 2024 г. — выборка из 1500 журналов)

6) for a group of journals included in the List of journals of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (category 2) (2023 — sample of 1482 journals; 2024 — sample of 1500 journals)



7) по группе российских журналов, входящих в список WOS (квартиль 4) (2023 г. — выборка из 270 журналов; 2024 г. — выборка из 249 журналов)

7) for the group of Russian journals included in the WOS list (quartile 4) (2023 — sample of 270 journals; 2024 — sample of 249 journals)

8) по группе российских журналов, входящих в список Scopus (квартиль 4) (2023 г. — выборка из 304 журналов; 2024 г. — выборка из 330 журналов)

8) for the group of Russian journals included in the Scopus list (quartile 4) (2023 — sample of 304 journals; 2024 — sample of 330 journals)

Рис. 8. Показатель журнала в рейтинге Science Index (на стрелочных индикаторах)**Fig. 8.** Journal's ranking in the Science Index (on arrow indicators)

Показатель журнала в рейтинге Science Index на стрелочных индикаторах представлен на рисунке 8.

Сравнивая данные, представленные на рисунке 8, отмечаем, что показатель журнала в рейтинге Science Index увеличился с 6,02 до 6,07 за период 2023–2024 гг.

Анализируя данные (рис. 8), отмечаем, что журнал находится в наилучшей (зеленой) зоне по группе журналов, входящих в Перечень ВАК (2-я категория). По данному показателю журнал входит в число лучших 25% журналов в данной референтной группе.

Журнал входит в число лучших 50% журналов в референтных группах: журналов, входящих в Перечень ВАК; российских журналов, входящих в «Белый список» (4-й уровень).

Выводы/Conclusions

Проведено заседание редакционного совета, где рассмотрен анализ ранжирования и публикационной активности журнала за изучаемый период (2023 г. и 2024 г.). Предложены мероприятия по повышению наукометрических показателей журнала.

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. Виолин Б.В., Ребезов М.Б. Анализ публикационной активности журнала «Аграрная наука» за 2023 год. *Аграрная наука*. 2024; (1): 40–51. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-40-51>
2. Ребезов М.Б., Виолин Б.В. Сравнительный анализ публикационной активности журнала «Аграрная наука» за 2022–2023 гг. *Аграрная наука*. 2024; (3): 38–49. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-38-49>
3. Ребезов М.Б., Виолин Б.В. Наукометрический вектор развития. *Аграрная наука*. 2024; 1(10): 30–36. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-30-36>
4. Ребезов М.Б., Виолин Б.В. Сравнительный анализ за трехлетний период. *Аграрная наука*. 2025; (2): 42–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-42-53>

REFERENCES

1. Violin B.V., Rebezov M.B. Analysis of publication activity of the journal "Agrarian Science" for 2023. *Agrarian science*. 2024; (1): 40–51 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-40-51>
2. Rebezov M.B., Violin B.V. Comparative analysis of publication activity of the journal "Agrarian Science" for 2022–2023. *Agrarian science*. 2024; (3): 38–49 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-38-49>
3. Rebezov M.B., Violin B.V. Scientometric vector of development. *Agrarian science*. 2024; 1(10): 30–36. (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-30-36>
4. Rebezov M.B., Violin B.V. Comparative analysis over a three-year period. *Agrarian science*. 2025; (2): 42–53 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-42-53>

5. Ребезов М.Б., Виолин Б.В. Итоги года. *Аграрная наука*. 2025; 1(1): 37–49.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-37-49>

6. Андросов К.Ю., Киричек А.В., Спасенников В.В. Сравнительный анализ качества научных журналов технического университета и критерии их улучшения. *Эргодизайн*. 2024; (23): 3–21.
<http://doi.org/10.30987/2658-4026-2024-1-3-21>

7. Vasudevan B., Chatterjee M., Sharma V., Sahdev R. Indexing of Journals and Indices of Publications. *Indian Journal of Radiology and Imaging*. 2025; 35(S 01): S148–S154.
<http://doi.org/10.1055/s-0044-1800878>

8. Герасименко П.В. Общий подход ранжирования публикационной активности ученых с помощью индексов значимости журналов и источников их цитирований, размещенных в базах данных: РИНЦ, WoS, Scopus. *Основы экономики, управления и права*. 2024; 3(42): 54–62.
http://doi.org/10.51608/23058641_2024_3_54

9. Елизаров А.М., Писляков В.В. Журнальный импакт-фактор: математические и статистические свойства. *Ученые записки Казанского университета*. Серия: Физико-математические науки. 2024; 166(4): 485–498.
<http://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.485-498>

10. Todosiychuk A.V. Scientometric Indicators in the System of Evaluating Scientific Performance and Work. *Scientific and Technical Information Processing*. 2024; 51(2): 154–160.
<http://doi.org/10.3103/S0147688224700084>

5. Rebezov M.B., Violin B.V. Results of the year. *Agrarian science*. 2025; 1(1): 37–49 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-37-49>

6. Androsov K.Yu., Kirichek A.V., Spasennikov V.V. Comparative Analysis of the Quality of the Technical University Scientific Journals and Improvement Criteria *Ergodesign*. 2024; (23): 3–21 (in Russian).
<http://doi.org/10.30987/2658-4026-2024-1-3-21>

7. Vasudevan B., Chatterjee M., Sharma V., Sahdev R. Indexing of Journals and Indices of Publications. *Indian Journal of Radiology and Imaging*. 2025; 35(S 01): S148–S154.
<http://doi.org/10.1055/s-0044-1800878>

8. Gerasimenko P.V. Universal approach of ranking of scientists' publishing activity by means of generalized index of significance of publications and sources of their citations placed in databases: RSCI, WoS, Scopus. *Economy, governance and lave basis*. 2024; 3(42): 54–62 (in Russian).
http://doi.org/10.51608/23058641_2024_3_54

9. Elizarov A.M., Pisyakov V.V. Journal impact factor: mathematical and statistical properties. *Scientific notes of Kazan University. Series: Physical and mathematical sciences*. 2024; 166(4): 485–498 (in Russian).
<http://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.485-498>

10. Todosiychuk A.V. Scientometric Indicators in the System of Evaluating Scientific Performance and Work. *Scientific and Technical Information Processing*. 2024; 51(2): 154–160.
<http://doi.org/10.3103/S0147688224700084>

ОБ АВТОРАХ

Максим Борисович Ребезов^{1,2}

• доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник¹

• доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов²
 rebezov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Борис Викторович Виолин³

кандидат ветеринарных наук
 agrovetpress@inbox.ru

Ярослав Максимович Ребезов⁴

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>

¹Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

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

³Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии — филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.Р. Коваленко Российской академии наук», Звенигородское шоссе, 5, Москва, 123022, Россия

⁴Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, 173003, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Maksim Borisovich Rebezov^{1,2}

• Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor, Chief Researcher¹

• Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products²
 rebezov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Boris Viktorovich Violin³

Candidate of Veterinary Sciences
 agrovetpress@inbox.ru

Yaroslav Maksimovich Rebezov⁴

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>

¹Gorbatov Research Center for Food Systems, 26 Talalikhin Str., Moscow, 109316, Russia

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

³All-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

⁴Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya Str., Veliky Novgorod, 173003, Russia

УДК 619:616.578.242

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-15-21

А.Р. Ахунова¹

А.Г. Галеева^{1, 2} ✉

А.И. Яруллин¹

М.А. Ефимова^{1, 2}

Д.Н. Мингалеев^{1, 2}

Р.Х. Равилов²

¹Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, Казань, Россия

²Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

✉ antonina-95@yandex.ru

Поступила в редакцию: 07.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Ахунова А.Р., Галеева А.Г., Яруллин А.И., Ефимова М.А., Мингалеев Д.Н., Равилов Р.Х.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-15-21

Alsu R. Akhunova¹

Antonina G. Galeeva^{1, 2} ✉

Ainur A. Yarullin¹

Marina A. Efimova^{1, 2}

Danil N. Mingaleev^{1, 2}

Rustam Kh. Ravilov²

¹Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russia

²Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

✉ antonina-95@yandex.ru

Received by the editorial office: 07.07.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Akhunova A.R., Galeeva A.G., Yarullin A.I., Efimova M.A., Mingaleev D.N., Ravilov R.Kh.

Выделение и очистка рекомбинантного гексона бычьего аденовируса 3-го типа

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Аденовирусы (*Mastadenovirus*, *Adenoviridae*) являются одним из преобладающих этиологических агентов комплекса респираторно-кишечных заболеваний КРС, занимая до 70% в нозологической структуре заболеваемости молодняка. Диагностика аденовирусной инфекции затруднена в связи с разнообразием серотипов. Наиболее широкое распространение в практике получил иммуноферментный анализ. Повысить чувствительность и специфичность метода возможно путем комплектации тест-систем очищенными рекомбинантными антигенами.

Методы. В работе применяли методы биоинформационного анализа и генной инженерии. Клонирование синтезированной вставки, кодирующей фрагмент гена гексона, осуществляли в вектор pET-22b(+), экспрессию проводили в организме *E. coli*. Для подбора условий очистки применяли классические методы дезинтеграции клеток в сочетании с металлхелатной аффинной хроматографией.

Результаты. С помощью классических методов биоинформационного анализа нуклеотидной последовательности штамма WBR-1 бычьего аденовируса 3-го типа была разработана эпитопная структура усеченного рекомбинантного гексона молекулярной массой 17,0 кДа, белок с гексагистиридиновым тегом был синтезирован в прокариотической системе экспрессии штаммом-продуцентом *E. coli* BL21(DE3)pLysS/pET-22b(+)-Hexon в виде телец включения. Были подобраны оптимальные условия культивирования штамма и проведения металлхелатной хроматографической очистки на Ni-NTA сефарозе в денатурирующих условиях, что позволило получить электрофоретически гомогенный продукт. Были оптимизированы условия постановки непрямого иммуноферментного анализа на основе рекомбинантного гексона. Описанный в работе методический подход может быть применен для получения рекомбинантного гексона в качестве антигена для получения поликлональных или моноклональных антител против аденовируса 3-го типа, что более эффективно и экономично по сравнению с антигеном нативного вируса, культивируемого в клетках млекопитающих.

Ключевые слова: аденовирус крупного рогатого скота, гексон, рекомбинантный белок, металлхелатная хроматография, иммуноферментный анализ

Для цитирования: Ахунова А.Р., Галеева А.Г., Яруллин А.И., Ефимова М.А., Мингалеев Д.Н., Равилов Р.Х. Выделение и очистка рекомбинантного гексона бычьего аденовируса 3-го типа. Аграрная наука. 2025; 400(11): 15–21.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-15-21>

Isolation and purification of recombinant bovine adenovirus type 3 hexone

ABSTRACT

Relevance. Adenoviruses (*Mastadenovirus*, *Adenoviridae*) are among the prevailing etiologic agents of the complex of respiratory and intestinal diseases of cattle, accounting for up to 70% of the nosological structure of morbidity in young animals. Diagnosis of adenovirus infection is difficult due to the diversity of serotypes, the most widely used in practice is enzyme immunoassay. It is possible to increase the sensitivity and specificity of the method by equipping test systems with purified recombinant antigens.

Methods. The work used methods of bioinformatics analysis and genetic engineering. Cloning of the synthesized insert encoding a fragment of the hexon gene was carried out in the pET-22b(+) vector, expression was carried out in *E. coli* organism. Classical methods of cell disintegration in combination with metal-chelate affinity chromatography were used to select purification conditions.

Results. Using classical methods of bioinformatics analysis of the nucleotide sequence of the WBR-1 strain of bovine adenovirus type 3, the epitope structure of the truncated recombinant hexon with a molecular weight of 17.0 kDa was developed. The protein with a hexahistidine tag was synthesized in a prokaryotic expression system by the producer strain *E. coli* BL21(DE3)pLysS/pET-22b(+)-Hexon in the form of inclusion bodies. Optimal conditions for culturing the strain and performing metal-chelate chromatographic purification on Ni-NTA Sepharose under denaturing conditions were selected, which made it possible to obtain an electrophoretically homogeneous product. Conditions for setting up an indirect enzyme immunoassay based on recombinant hexon were optimized. The methodological approach described in the work can be applied to obtain recombinant hexon as an antigen for obtaining polyclonal or monoclonal antibodies against adenovirus type 3, which is more effective and economical compared to the antigen of the native virus cultured in mammalian cells.

Key words: bovine adenovirus, hexon, recombinant protein, metal chelate chromatography, enzyme-linked immunosorbent assay

For citation: Akhunova A.R., Galeeva A.G., Yarullin A.I., Efimova M.A., Mingaleev D.N., Ravilov R.Kh. Isolation and purification of recombinant bovine adenovirus type 3 hexone. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 15–21 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-15-21>

Введение/Introduction

Аденовирусы (BAdV) принадлежат к роду *Mastadenovirus*, семейству *Adenoviridae* (аденовирусы млекопитающих) и вызывают респираторные и желудочно-кишечные инфекции у крупного рогатого скота (КРС) [1, 2]. Заболеваемость болезнями, вызванными BAdV, в промышленном секторе может достигать свыше 45% [3, 4], что наносит значительный экономический ущерб скотоводству и ухудшает положение в области продовольственной безопасности страны. На сегодняшний день насчитываются 11 серотипов BAdV [1, 5].

Среди этих серотипов патогенностью отличается аденовирус 3-го типа (BAdV-3), встречающийся во всех регионах мира [6, 7]. На долю заболеваний молодняка, вызываемых BAdV-3, может приходиться от 60 до 70% заболеваемости КРС [8, 9].

Диагностика аденовирусной инфекции (АВИ) затруднена в связи с разнообразием серотипов вируса и со схожестью симптомов с клиническими проявлениями других инфекций КРС [10, 11]. BAdV-3 обнаруживается различными способами, такими как выделение изолятов вируса, прямая иммунофлуоресценция, гибридизация *in situ*, рестрикционный анализ и полимеразная цепная реакция, однако большинство из них длительны или трудоемки [9, 12].

Одним из значимых диагностических антигенов, позволяющих диагностировать аденовирусы, является его гексон [6, 9]. Гексон аденовируса представляет собой основной структурный белок вирусного капсида, который состоит из трех одинаковых протеинов (белок II от 110 до 120 кДа каждый), имеющих сложную антигенную структуру [13]. Гексон имеет групповую специфическую антигенную детерминанту (эпитоп), общую для всех представителей рода *Mastadenovirus*, с 85% сохранением аминокислотной последовательности [14].

По данным литературы, гексон BAdV-3 содержит в своем составе не только родоспецифическую, но и видоспецифическую, подвидоспецифическую, межвидоспецифическую и межродовую антигенные детерминанты [6, 15].

Наиболее широко употребляемым в ветеринарной практике методом серологической диагностики АВИ является иммуноферментный анализ (ИФА) [3, 16]. Возможность создания ИФА-тестов на основе рекомбинантных антигенов гарантирует безопасность их производства, высокие чувствительность и специфичность [17, 18].

Применение рекомбинантных антигенов в диагностических целях является важным технологическим преимуществом, поскольку даже при невозможности культивирования отдельных штаммов вируса при условии доступности нуклеотидных последовательностей позволит быстро реагировать на вновь появляющиеся геноварианты вируса. В связи с вышесказанным получение рекомбинантного аналога гексона открывает возможность применить полученные к нему моноклональные

антитела для детекции различных типов аденовирусов в клиническом материале.

Цели настоящей работы — выделение и очистка рекомбинантного аналога гексона бычьего аденовируса 3-го типа.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования были проведены с января по апрель 2025 г. на базе лаборатории вирусных антропоозоонозов ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности» (г. Казань).

Штаммы и плазмиды. Прогнозирование эпитопов проводили относительно аминокислотной последовательности штамма BAdV-3 WBR-1 (GenBank ID NC_001876.1). Клонирование целевой вставки осуществляли в экспрессирующий вектор pET-22b(+) (Novagen, Германия), в качестве штамма-реципиента использовали штамм *E. coli* BL21(DE3)pLysS, генотип B F- *dcm ompT hsdS(rB mB) gal [malB+]*K-12(λS) (Novagen, Германия).

Разработка эпитопной структуры рекомбинантного гексона. Для проведения анализа применяли комплекс подходов, применяемых в аналогичных работах [19, 20]. Прогнозирование Т- и В-клеточных эпитопов осуществляли относительно всей последовательности гексона (911 а. о.). Антигенность белков анализировали с помощью алгоритмов VaxiJen v.2.0¹. В-клеточные эпитопы анализировали при помощи сервера BepiPred-2.0 (DTU Health Tech, Дания), Т-клеточные линейные эпитопы — в программах TepiTool (<http://tools.iedb.org/tepitool/>) и NetMHCpan 4.1 (<http://www.cbs.dtu.dk/services/NetMHCpan/>) при установленных стандартных параметрах. Прогнозирование мембранной топологии белка, вычисление типов сигнальных последовательностей осуществляли при помощи онлайн-ресурсов DTU Health Tech (Дания), физико-химические свойства белка определяли с помощью инструмента ProtParam Tool (<https://web.expasy.org/protparam/>).

Экспрессия рекомбинантного гексона. Трансформацию химически компетентных клеток штамма *E. coli* BL21(DE3)pLysS и селекцию позитивных клонов проводили, как описано ранее [21, 22]. Культивирование штамма-продуцента *E. coli* BL21(DE3)pLysS/pET-22b(+)-Hexon осуществляли на селективной среде SOB с добавлением 200 мкг/мл ампициллина и 34 мкг/мл хлорамфеникола («Панэко», Россия) с индукцией 0,5 мМ изопропил-β-D-1-тиогалактопиранозидом (ИПТГ) («Диаэм», Россия) либо на аутоиндукционной среде RYP-5052 (с добавлением 0,2% лактозы) до насыщения. Наличие укороченного рекомбинантного гексона с прогнозируемой молекулярной массой 17,0 кДа в клеточных лизатах устанавливали методом электрофореза в денатурирующих условиях в 15,0%-ном полиакриламидном геле.

¹ <http://www.ddg-pharmfac.net/vaxijen/VaxiJen/VaxiJen.html>

Выделение и очистка белка из телец включения. Первичную очистку белка (солюбилизацию телец включения) проводили с применением «Набора для экстракции бактериального белка» («Диаэм», Россия), последующий подбор условий хроматографической очистки и рефолдинга базировался на методиках, изложенных в аналогичных работах [23–27]. Концентрацию белка определяли методом Брэдфорда [28].

Оценка серологической активности рекомбинантного гексона. Антигенную активность фрагмента гексона, извлеченного из телец включения, определяли в непрямом иммуноферментном анализе (ИФА) [29, 30]. Полистироловые иммунологические планшеты с показателем сорбции 400 нг/см² (Corning, США) сенсibilizировали рекомбинантным гексоном методом физической сорбции в рабочем разведении 2,5 мкг/мл на 0,02 М карбонатно-бикарбонатном буфере (pH 9,5) в течение 16 ч при 4 °C либо в течение 3 ч при 37 °C; концентрацию белка определяли по Bradford. Отмывку на всех этапах производили трехкратно 0,01 М фосфатно-солевым буфером с Tween-20 (pH 7,5). Далее в подсушенные лунки вносили по 100 мкл контрольных и испытуемых сывороток в рабочем разведении (в качестве положительного контроля использовали специфическую гипериммунную сыворотку КРС к BAdV-3, отрицательного — сыворотку безмолозивного теленка), инкубировали 1 ч. при 37 °C, после отмывки наслаивали по 100 мкл иммунопероксидазного конъюгата против антител быка (Sigma, США) и инкубировали в аналогичных условиях. Реакцию проявляли при помощи субстратного раствора тетраметилбензидина (Sigma-Aldrich, США) и инкубации в течение 20 мин. при комнатной температуре в темноте. Оптическую плотность (ОП) реакционной смеси в лунках после остановки реакции 2 М серной кислотой определяли на микропланшетном фотометре Model 680 (Bio-Rad, США) при длине волны 450 нм. Рабочие концентрации сенсibilizующего препарата рекомбинантного гексона и антивидового пероксидазного

конъюгата (Sigma, США) определяли методом шахматного титрования.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакетов программ Statistica 6.0 (StatSoft, США) и MS Excel 2016 (Microsoft, США). Для оценки достоверности различий применяли t-критерий Стьюдента, уровень статистической значимости был установлен на значении $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Для получения мономерной фракции рекомбинантного гексона BAdV-3 фрагмент ДНК длиной 483 п. н., кодирующий усеченный белок с прогнозируемой молекулярной массой 17,0 кДа, клонировали в плазмиду pET-22b(+). В результате была получена рекомбинантная конструкция pET-22b(+)/rHexon, в которой целевой ген находится под контролем модифицированного промотора бактериофага T7. Аминокислотная последовательность рекомбинантного гексона представлена на рисунке 1.

Расчетные характеристики рекомбинантного гексона были следующими: молекулярная масса — 17981,55 г/моль, коэффициент экстинкции — 10240 М⁻¹/см⁻¹, изоэлектрическая точка — pH 7,91, заряд при нейтральном pH — 0,9, прогнозируемая растворимость — низкая (рис. 2).

Экспрессию рекомбинантного гексона проводили в клетках штамма *E. coli* BL21(DE3)pLysS [30]. Было установлено, что в стандартных условиях

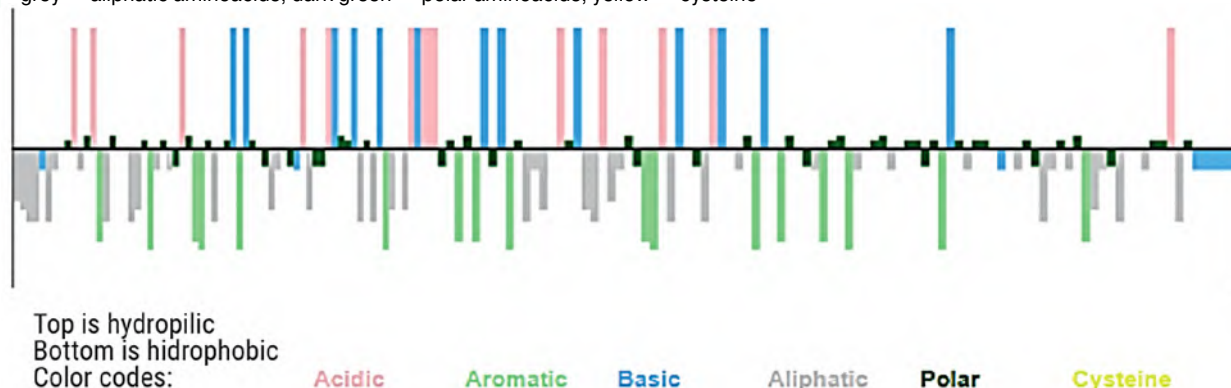
Рис. 1. Аминокислотная последовательность усеченного рекомбинантного гексона BAdV-3 (полужирным шрифтом обозначены мажорные иммунодоминантные эпитопы, подчеркиванием — гистидиновый тег)

Fig. 1. Amino acid sequence of the truncated recombinant hexon of BAdV-3 (major immunodominant epitopes are shown in bold, and the histidine tag is underlined)

MVLHIIAGQDASEYLSPLGLVQFAQATESYFNIGNKFR
 NPTVAPTHDVTTERSQRLQLRFVPVDREDTQYSYKTRF
 QLAVGDNRLVDMASTYFDIRGTLER GASFKPYS GTAY
 NSFAPNSAPNNTQFRQANNGH PAQTIAQASYVATIG
 GANNDLQHNNHHH

Рис. 2. Распределение аминокислот в структуре рекомбинантного гексона: верхняя часть представлена гидрофильными аминокислотами, нижняя — гидрофобными. Цветовой код: розовый — кислые аминокислоты, зеленый — ароматические аминокислоты, голубой — основные аминокислоты, серый — алифатические аминокислоты, темно-зеленый — полярные аминокислоты, желтый — цистеин

Fig. 2. Distribution of amino acids in the structure of recombinant hexon: the upper part is represented by hydrophilic amino acids, the lower part by hydrophobic ones. Color codes: pink — acidic aminoacids, green — aromatic aminoacids, blue — basic aminoacids, grey — aliphatic aminoacids, dark green — polar aminoacids, yellow — cysteine



культивирования (37,0 °C, 180 rpm, индукция 0,5 mM ИПТГ) [21] высокий уровень экспрессии гена приводил к накоплению гексона в клетках в агрегированной форме (в виде телец включения). Классические подходы к увеличению доли растворимой фракции белка (культивирование при субоптимальных температурах (25 °C и 30 °C), снижение концентрации ИПТГ до 0,1 mM, культивирование в аутоиндукционной среде, смена штамма-реципиента) [30, 31] не приводили к желаемому результату. В связи с этим перед авторами встала задача разработки быстрого и экономичного способа извлечения из телец включения антигена, пригодного для целей серологической диагностики.

В ходе подбора методического подхода к выделению гексона были апробированы протоколы [24–27], позволяющие избежать обширных этапов хроматографической очистки, в частности инкубация отмывых телец включения в 2,0 M растворе мочевины; в органических растворителях (эквимольная смесь фенол — хлороформ; смесь бутанол — пропанол — вода в соотношении 2:1:2); в растворах анионных детергентов (лаурилсаркозинат натрия с добавлением тритона X-100).

Данные способы позволяли достичь доли растворимой фракции белка, не превышающей 10,0% от суммарного выхода белка, в связи с чем оптимизировали подход к хроматографической очистке телец включения в денатурирующих условиях.

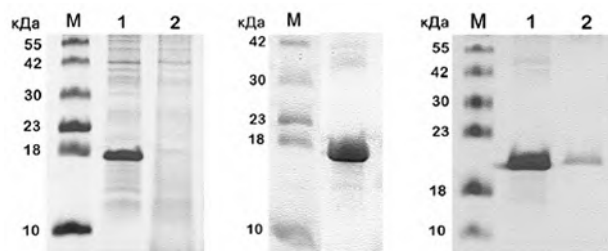
Установлено, что при обработке осадков индуцированных клеток лизирующим буфером с концентрацией мочевины не более 6,0 M (6,0 M мочевины, 100 mM Na_2HPO_4 , 10,0 mM трис-HCl, pH 8,0) при покачивании при комнатной температуре в течение 2 ч. большая часть белка переходила в растворимую форму. Для выделения телец включения одинаково эффективными были как соникация осадков с последующим низкоскоростным центрифугированием, так и отмывка при помощи коммерческого «Набора для экстракции бактериального белка» («Диаэм», Россия); в обоих случаях удавалось получить препарат телец включения с минимальным количеством минорных примесей (рис. 3Б).

После этого колонку с Ni-NTA сефарозой («Абисенс», Россия) уравнивали денатурирующим промывочным буфером (6 M мочевины, 100 mM Na_2HPO_4 , 10 mM трис-HCl, 50 mM имидазола, pH 5,3) и проводили сорбцию денатурированных телец включения (рис. 3В, трек 1).

Связанный гексон элюировали аналогичным буфером с добавлением 300 mM имидазола; в первых фракциях элюата обнаруживали целевую мажорную фракцию молекулярной массой 17,0 кДа (рис. 3В, трек 2). На заключительном этапе в целях возвращения биологически активной структуры гексон BAdV-3 подвергали рефолдингу в буфере, содержащей 1,5 M мочевины, 50,0 mM трис-HCl, 200 mM NaCl, 10,0% глицерин (pH 8,0), что позволило получить ренатурированный белок, пригодный как для целей серологической диагностики,

Рис. 3. Электрофореграммы препарата рекомбинантного гексона на различных этапах выделения и очистки: А — оценка функциональности системы экспрессии (M — маркер молекулярных масс Servicebio (Китай), 1 — лизат индуцированных клеток штамма-продуцента, 2 — лизат клеток штамма-реципиента, трансформированного плазмидой без вставки); Б — препарат отмывых телец включения; В — контроль хроматографической очистки (1 — солюбилизованные тельца включения, 2 — рекомбинантный гексон, элюированный возрастающими концентрациями имидазола с Ni-NTA сефарозы)

Fig. 3. Electrophoregrams of the recombinant hexon preparation at different stages of isolation and purification: A — evaluation of the expression system functionality (M — molecular weight marker “Servicebio” (China), 1 — induced producer strain cell lysate, 2 — recipient strain cell lysate transformed with a plasmid without an insert); B — preparation of washed inclusion bodies; C — chromatographic purification control (1 — solubilized inclusion bodies, 2 — recombinant hexon eluted with increasing concentrations of imidazole from Ni-NTA Sepharose)



а (a)

б (b)

в (c)

так и для иммунизации животных. Данный (рефолдированный) образец белка был исследован в ИФА со специфическими гипериммунными антисыворотками, продемонстрировав высокую серологическую активность (коэффициент позитивности — до 19,5 ед.). Следует отметить, что с гипериммунными сыворотками к гетерологичным возбудителям рекомбинантный антиген реагировал на уровне отрицательного контроля.

Полученные результаты подтверждают активность и специфичность рекомбинантного гексона BAdV-3 в отношении специфических антисывороток. Описанный в настоящей работе методический подход может быть применен для получения рекомбинантного гексона в качестве антигена для поликлональных или моноклональных антител против BAdV-3, что более экспрессивно и экономично по сравнению с нативным вирусом, культивируемым в клетках млекопитающих.

Выводы/Conclusions

В ходе проведенных исследований с помощью методов биоинформационного анализа, геной инженерии и аффинной хроматографии был получен рекомбинантный аналог гексона BAdV-3 прокариотического происхождения.

Результаты постановки непрямого варианта ИФА с рекомбинантным гексоном в качестве диагностического антигена позволили установить высокую активность и специфичность последнего в отношении специфических антисывороток.

Дальнейшие исследования открывают перспективы применения полученного антигенного препарата в качестве компонента ИФА-тест-системы для серологической диагностики АВИ.

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

- Jesse S.T. *et al.* Molecular characterization of a bovine adenovirus type 7 (Bovine Adenovirus F) strain isolated from a systemically infected calf in Germany. *Virology Journal*. 2022; 19: 89. <https://doi.org/10.1186/s12985-022-01817-y>
- Vidovszky M.Z., Szeredi L., Doszpoly A., Harrach B., Hornyák Á. Isolation and complete genome sequence analysis of a novel ovine adenovirus type representing a possible new mastadenovirus species. *Archives of Virology*. 2019; 164(8): 2205–2207. <https://doi.org/10.1007/s00705-019-04299-6>
- Каримуллина И.Г. и др. Серологический мониторинг респираторных и желудочно-кишечных заболеваний крупного рогатого скота в молочных комплексах Приволжского федерального округа. *Ветеринария Кубани*. 2025; (2): 13–15. <https://www.elibrary.ru/cgebya>
- Яруллин А.И. и др. Оценка серопревалентности аденовирусной инфекции крупного рогатого скота в некоторых животноводческих хозяйствах. *Инновационные решения актуальных вопросов биологической и токсикологической безопасности. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Казань. 2023; 214–216. <https://elibrary.ru/knzcne>
- Shemelkova G.O., Yuzhakov A.G., Zaberezhny A.D., Shemelkov E.V., Aliper T.I. Development of a test system for detecting bovine adenovirus DNA based on polymerase chain reaction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 315(4): 042027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/4/042027>
- Гаффаров Х.З., Яруллин А.И., Гумеров В.Г., Каримуллина И.Г., Усольцев К.В. Аденовирусы крупного рогатого скота (обзор). *Ветеринария*. 2019; (11): 3–8. <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2019.22.11.03-08>
- Shen Y., Liu J., Zhang Y., Ma X., Yue H., Tang C. Prevalence and characteristics of a novel bovine adenovirus type 3 with a natural deletion fiber gene. *Infection, Genetics and Evolution*. 2020; 83: 104348. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2020.104348>
- Li Q., He S., Zou Y., Yue H., Tang C., Liu J. Pathogenicity of a novel bovine adenovirus type 3 with a natural deletion partial fiber gene in BALB/c mice. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1138159. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1138159>
- Mukantayev K.N., Tursunov K.A., Kanayev D.B., Tokhtarova L., Ramankulov Ye.M., Mukanov K.K. Obtaining strain-producer of recombinant hexon of bovine adenovirus type 3. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2019; (1): 73–84. <https://elibrary.ru/wznmfh>
- Vaatstra B.L., Tisdall D.J., Blackwood M., Fairley R.A. Clinicopathological features of 11 suspected outbreaks of bovine adenovirus infection and development of a real-time quantitative PCR to detect bovine adenovirus type 10. *New Zealand Veterinary Journal*. 2016; 64(5): 308–313. <https://doi.org/10.1080/00480169.2016.1198280>
- Werid G.M. *et al.* Bovine adenovirus prevalence and its role in bovine respiratory disease complex: A systematic review and meta-analysis. *The Veterinary Journal*. 2025; 310: 106303. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2025.106303>
- Lehmkuhl H.D., Smith M.H., Dierks R.E. A bovine adenovirus type 3: Isolation, characterization, and experimental infection in calves. *Archives of Virology*. 1975; 48(1): 39–46. <https://doi.org/10.1007/BF01320564>
- Gundegmaa U., Raadan O., Wu H.-C., Wang H.-Y., Wu M.-C., Chu C.-Y. Recombinant hexon protein as a new bovine adenovirus type 3 subunit vaccine candidate. *Journal of Veterinary Research*. 2023; 67(1): 23–31. <https://doi.org/10.2478/jvetres-2023-0014>
- Toogood C.I.A., Crompton J., Hay R.T. Antipeptide antisera define neutralizing epitopes on the adenovirus hexon. *Journal of General Virology*. 1992; 73(6): 1429–1435. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-73-6-1429>
- Chiocca S., Kurzbauer R., Schaffner G. *et al.* The complete DNA sequence and genomic organization of the ovian adenovirus CELO. *J. Virol.* 1996; 79: 2939–2949. <https://elibrary.ru/vjtsrh>
- Rossmann W., Horvath E. Bovine adenoviruses. VI. An enzyme-linked immunosorbent assay for detection of antibodies to bovine adenovirus types belonging to subgroups I and II. *Microbiologica*. 1988; 11(4): 387–394.

REFERENCES

- Jesse S.T. *et al.* Molecular characterization of a bovine adenovirus type 7 (Bovine Adenovirus F) strain isolated from a systemically infected calf in Germany. *Virology Journal*. 2022; 19: 89. <https://doi.org/10.1186/s12985-022-01817-y>
- Vidovszky M.Z., Szeredi L., Doszpoly A., Harrach B., Hornyák Á. Isolation and complete genome sequence analysis of a novel ovine adenovirus type representing a possible new mastadenovirus species. *Archives of Virology*. 2019; 164(8): 2205–2207. <https://doi.org/10.1007/s00705-019-04299-6>
- Karimullina I.G. *et al.* Serological monitoring of respiratory and gastrointestinal diseases of the large horned cattle in dairy complexes of the Volga Federal District. *Veterinaria Kubani*. 2025; (2): 13–15 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/cgebya>
- Yarullin A.I. *et al.* Assessment of the seroprevalence of adenovirus infection in cattle in some livestock farms. *Innovative solutions to topical issues of biological and toxicological safety. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Kazan. 2023; 214–216 (in Russian). <https://elibrary.ru/knzcne>
- Shemelkova G.O., Yuzhakov A.G., Zaberezhny A.D., Shemelkov E.V., Aliper T.I. Development of a test system for detecting bovine adenovirus DNA based on polymerase chain reaction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 315(4): 042027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/4/042027>
- Gaffarov Kh.Z., Yarullin A.I., Gumerov V.G., Karimullina I.G., Usoltsev K.V. Biological properties of adenoviruses and their role in respiratory-intestinal pathology of cattle (review). *Veterinary medicine*. 2019; (11): 3–8 (in Russian). <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2019.22.11.03-08>
- Shen Y., Liu J., Zhang Y., Ma X., Yue H., Tang C. Prevalence and characteristics of a novel bovine adenovirus type 3 with a natural deletion fiber gene. *Infection, Genetics and Evolution*. 2020; 83: 104348. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2020.104348>
- Li Q., He S., Zou Y., Yue H., Tang C., Liu J. Pathogenicity of a novel bovine adenovirus type 3 with a natural deletion partial fiber gene in BALB/c mice. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1138159. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1138159>
- Mukantayev K.N., Tursunov K.A., Kanayev D.B., Tokhtarova L., Ramankulov Ye.M., Mukanov K.K. Obtaining strain-producer of recombinant hexon of bovine adenovirus type 3. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2019; (1): 73–84. <https://elibrary.ru/wznmfh>
- Vaatstra B.L., Tisdall D.J., Blackwood M., Fairley R.A. Clinicopathological features of 11 suspected outbreaks of bovine adenovirus infection and development of a real-time quantitative PCR to detect bovine adenovirus type 10. *New Zealand Veterinary Journal*. 2016; 64(5): 308–313. <https://doi.org/10.1080/00480169.2016.1198280>
- Werid G.M. *et al.* Bovine adenovirus prevalence and its role in bovine respiratory disease complex: A systematic review and meta-analysis. *The Veterinary Journal*. 2025; 310: 106303. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2025.106303>
- Lehmkuhl H.D., Smith M.H., Dierks R.E. A bovine adenovirus type 3: Isolation, characterization, and experimental infection in calves. *Archives of Virology*. 1975; 48(1): 39–46. <https://doi.org/10.1007/BF01320564>
- Gundegmaa U., Raadan O., Wu H.-C., Wang H.-Y., Wu M.-C., Chu C.-Y. Recombinant hexon protein as a new bovine adenovirus type 3 subunit vaccine candidate. *Journal of Veterinary Research*. 2023; 67(1): 23–31. <https://doi.org/10.2478/jvetres-2023-0014>
- Toogood C.I.A., Crompton J., Hay R.T. Antipeptide antisera define neutralizing epitopes on the adenovirus hexon. *Journal of General Virology*. 1992; 73(6): 1429–1435. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-73-6-1429>
- Chiocca S., Kurzbauer R., Schaffner G. *et al.* The complete DNA sequence and genomic organization of the ovian adenovirus CELO. *J. Virol.* 1996; 79: 2939–2949. <https://elibrary.ru/vjtsrh>
- Rossmann W., Horvath E. Bovine adenoviruses. VI. An enzyme-linked immunosorbent assay for detection of antibodies to bovine adenovirus types belonging to subgroups I and II. *Microbiologica*. 1988; 11(4): 387–394.

17. Kulkarni D.D. *et al.* Development and Evaluation of Recombinant Nucleocapsid Protein Based Diagnostic ELISA for Detection of Nipah Virus Infection in Pigs. *Journal of Immunoassay and Immunochemistry*. 2016; 37(2): 154–166. <https://doi.org/10.1080/15321819.2015.1074922>
18. Spencer K.-A., Osorio F.A., Hiscox J.A. Recombinant viral proteins for use in diagnostic ELISAs to detect virus infection. *Vaccine*. 2007; 25(30): 5653–5659. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2007.02.053>
19. Дятлова В.И. Применение методов обратной вакцинологии для разработки новых вакцин против бруцеллеза. *Бактериология*. 2021; 6(4): 16–29. <https://elibrary.ru/vswoqs>
20. Мима К.А., Каторкина Е.И., Каторкин С.А., Цыбанов С.Ж., Малооголовкин А.С. *In silico* идентификация В- и Т-клеточных эпитопов белка CD2v вируса африканской чумы свиней (*African swine fever virus, Asfivirus, Asfarviridae*). *Вопросы вирусологии*. 2020; 65(2): 103–112. <https://doi.org/10.36233/0507-4088-2020-65-2-103-112>
21. Ахунова А.Р., Насыров Ш.М., Алеева З.З., Арутюнян Г.С., Галеева А.Г., Ефимова М.А. Получение рекомбинантного гликопротеина Erns вируса классической чумы свиней для DIVA-совместимых тест-систем. *Ветеринария Кубани*. 2024; (6): 21–23. <https://elibrary.ru/gjstyb>
22. Froger A., Hall J.E. Transformation of Plasmid DNA into *E. coli* Using the Heat Shock Method. *JoVE*. 2007; (6): e253. <https://doi.org/10.3791/253>
23. Груднин М.П. и др. Клонирование и экспрессия в *E. coli* рекомбинантного белка VP1 вируса инфекционной анемии птиц. *Российский ветеринарный журнал*. 2019; (2): 12–20. https://doi.org/10.32416/article_5cd16d06b14db8.99635578
24. Grabski A., Drott D., Handley M., Mehler M., Novy R. Extraction and Purification of Proteins from *E. Coli* without Harvesting Cells. *The Scientific World Journal*. 2002; 2(1): 36–38. <https://doi.org/10.1100/tsw.2002.19>
25. Park A.-R., Jang S.-W., Kim J.-S., Park Y.-G., Koo B.-S., Lee H.-C. Efficient recovery of recombinant CRM197 expressed as inclusion bodies in *E. coli*. *PLOS One*. 2018; 13(7): e0201060. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201060>
26. Nekoufar S., Fazeli A., Reza Fazeli M. Solubilization of Human Interferon β -1b Inclusion Body Proteins by Organic Solvents. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. 2020; 10(2): 233–238. <https://doi.org/10.34172/apb.2020.027>
27. Singh S.M., Panda A.K. Solubilization and refolding of bacterial inclusion body proteins. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2005; 99(4): 303–310. <https://doi.org/10.1263/jbb.99.303>
28. Kielkopf C.L., Bauer W., Urbatsch I.L. Bradford Assay for Determining Protein Concentration. *Cold Spring Harbor Protocols*. 2020; 2020(4): 102269. <https://doi.org/10.1101/pdb.prot102269>
29. Галеева А.Г. и др. Экспрессия в *E. Coli* маркированного рекомбинантного гликопротеина E2 вируса классической чумы свиней. *Международный вестник ветеринарии*. 2024; (2): 49–57. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2024.2.49>
30. Николаева Ю.А. и др. Рекомбинантный нуклеопротеин вируса репродуктивно-респираторного синдрома свиней для серологической диагностики. *Ветеринарный врач*. 2025; (2): 85–93. <https://elibrary.ru/sclvyp>
31. Волосникова Е.А. и др. Получение растворимого интерферона гамма человека в системе экспрессии *Escherichia coli* при снижении температуры культивирования. *Прикладная биохимия и микробиология*. 2023; 59(2): 167–173. <https://doi.org/10.31857/S0555109923020174>
17. Kulkarni D.D. *et al.* Development and Evaluation of Recombinant Nucleocapsid Protein Based Diagnostic ELISA for Detection of Nipah Virus Infection in Pigs. *Journal of Immunoassay and Immunochemistry*. 2016; 37(2): 154–166. <https://doi.org/10.1080/15321819.2015.1074922>
18. Spencer K.-A., Osorio F.A., Hiscox J.A. Recombinant viral proteins for use in diagnostic ELISAs to detect virus infection. *Vaccine*. 2007; 25(30): 5653–5659. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2007.02.053>
19. Dyatlova V.I. Application of reverse vaccinology methods for the development of new vaccines against brucellosis. *Bacteriology*. 2021; 6(4): 16–29 (in Russian). <https://elibrary.ru/vswoqs>
20. Mima K.A., Katorkina E.I., Katorkin S.A., Tsybanov S.Zh., Malogolovkin A.S. *In silico* prediction of B- and T-cell epitopes in the CD2v protein of african swine fever virus (*African swine fever virus, Asfivirus, Asfarviridae*). *Problems of Virology*. 2020; 65(2): 103–112 (in Russian). <https://doi.org/10.36233/0507-4088-2020-65-2-103-112>
21. Akhunova A.R., Nasyrov Sh.M., Aleeva Z.Z., Arutyunyan G.S., Galeeva A.G., Efimova M.A. Classic swine fever virus Erns glycoprotein recombinant production for DIVA-compatible test systems. *Veterinaria Kubani*. 2024; (6): 21–23 (in Russian). <https://elibrary.ru/gjstyb>
22. Froger A., Hall J.E. Transformation of Plasmid DNA into *E. coli* Using the Heat Shock Method. *JoVE*. 2007; (6): e253. <https://doi.org/10.3791/253>
23. Grudinin M.P. *et al.* Generation and characterization of the VP1 recombinant protein of the chicken anemia virus. *Russian Veterinary Journal*. 2019; (2): 12–20 (in Russian). https://doi.org/10.32416/article_5cd16d06b14db8.99635578
24. Grabski A., Drott D., Handley M., Mehler M., Novy R. Extraction and Purification of Proteins from *E. Coli* without Harvesting Cells. *The Scientific World Journal*. 2002; 2(1): 36–38. <https://doi.org/10.1100/tsw.2002.19>
25. Park A.-R., Jang S.-W., Kim J.-S., Park Y.-G., Koo B.-S., Lee H.-C. Efficient recovery of recombinant CRM197 expressed as inclusion bodies in *E. coli*. *PLOS One*. 2018; 13(7): e0201060. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201060>
26. Nekoufar S., Fazeli A., Reza Fazeli M. Solubilization of Human Interferon β -1b Inclusion Body Proteins by Organic Solvents. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. 2020; 10(2): 233–238. <https://doi.org/10.34172/apb.2020.027>
27. Singh S.M., Panda A.K. Solubilization and refolding of bacterial inclusion body proteins. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2005; 99(4): 303–310. <https://doi.org/10.1263/jbb.99.303>
28. Kielkopf C.L., Bauer W., Urbatsch I.L. Bradford Assay for Determining Protein Concentration. *Cold Spring Harbor Protocols*. 2020; 2020(4): 102269. <https://doi.org/10.1101/pdb.prot102269>
29. Galeeva A.G. *et al.* Expression of the labeled recombinant glycoprotein E2 of the classical swine fever virus in *E. Coli*. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2024; (2): 49–57 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2024.2.49>
30. Nikolaeva Yu.A. *et al.* Recombinant nucleoprotein of porcine reproductive and respiratory syndrome virus for serological diagnostics. *The Veterinarian*. 2025; (2): 85–93 (in Russian). <https://elibrary.ru/sclvyp>
31. Volosnikova E.A. *et al.* Production of Soluble Human Gamma Interferon in the *Escherichia coli* Expression System with a Decrease in Cultivation Temperature. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2023; 59(2): 167–173 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0555109923020174>

ОБ АВТОРАХ

Алсу Рузалева Ахунова¹

младший научный сотрудник
aahunova@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-0211-3334>

Антонина Глебовна Галеева^{1, 2}

кандидат ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник
antonina-95@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2650-6459>

Айнур Ильнурович Яруллин¹

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
abii@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1717-0498>

ABOUT THE AUTHORS

Alsu Ruzaleva Akhunova¹

Junior Researcher
aahunova@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-0211-3334>

Antonina Glebova Galeeva^{1, 2}

Candidate of Veterinary Sciences, Leading Researcher
antonina-95@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2650-6459>

Ainur Ilnurovich Yarullin¹

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher
abii@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1717-0498>

Марина Анатольевна Ефимова^{1,2}

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
marina-2004r@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8786-1310>

Данил Наильевич Мингалеев^{1,2}

доктор ветеринарных наук, доцент, директор¹;
доктор ветеринарных наук, доцент²
damin80@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7217-4083>

Рустам Хаметович Равилов²

доктор ветеринарных наук, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, профессор кафедры эпизоотологии и паразитологии
rustam.ravilov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7210-7470>

¹Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности,
Научный городок — 2, Казань, 420075, Россия

²Казанский государственный аграрный университет,
ул. им. К. Маркса, 65, Казань, 420015, Россия

Marina Anatolyevna Efimova^{1,2}

Doctor in Biological Sciences, Leading Researcher
marina-2004r@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8786-1310>

Danil Nailevich Mingaleev^{1,2}

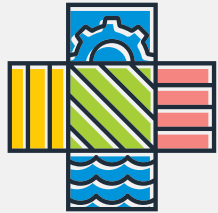
Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, Director¹;
Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor²
damin80@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7217-4083>

Rustam Khametovich Ravilov²

Doctor of Veterinary Sciences, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Professor of the Department of Epizootology and Parasitology
rustam.ravilov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7210-7470>

¹Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety,
Nauchny gorodok — 2, Kazan, 420075, Russia

²Kazan State Agrarian University,
65 K. Marx Str., Kazan, 420015, 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



Т.В. Севастьянова¹ ✉Б.В. Уша²С.Б. Носков³А.А. Альшевская⁴

¹Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности, Лосино-Петровский, Московская обл., Россия

²Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

³Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, Белгород, Россия

⁴Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), Москва, Россия

✉ tatianankenegen@gmail.com

Поступила в редакцию: 05.09.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Севастьянова Т.В., Уша Б.В., Носков С.Б., Альшевская А.А.

Tatiana V. Sevastyanova¹ ✉Boris V. Usha²Sergey B. Noskov³Alina A. Alshevskaya⁴

¹All-Russian Research and Technological Institute of the Biological Industry, Losino-Petrovsky, Moscow region, Russia

²All-Russian University of Biotechnology (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

³Belgorod State Agricultural University named after V.Ya. Gorin, Belgorod, Russia

⁴I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Sechenovskiy University), Moscow, Russia

✉ tatianankenegen@gmail.com

Received by the editorial office: 05.09.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Sevastyanova T.V., Usha B.V., Noskov S.B., Alshevskaya A.A.

Влияние функциональных таргетных пробиотиков на показатели неспецифической резистентности молодняка сельскохозяйственных животных

РЕЗЮМЕ

В статье рассмотрены взаимосвязь оси «кишечник — печень» и механизмы влияния функциональных таргетных пробиотиков на показатели неспецифической резистентности сельскохозяйственных животных. В ходе эволюции у животных сформировалась многоуровневая система защиты от факторов внешней среды, ведущим компонентом которой является иммунная система, распознающая патоген-ассоциированные молекулярные паттерны и инициирующая врожденные и адаптивные иммунные реакции. Особое значение имеют фагоцитоз и гуморальные факторы естественной резистентности (лизоцим, пропердин, бактерицидная активность сыворотки крови), а также микробиота кишечника, регулирующая иммунный гомеостаз в рамках оси «кишечник — печень». Полученные экспериментальные данные демонстрируют выраженный иммуномодулирующий эффект, проявляющийся в достоверном усилении фагоцитарной активности нейтрофилов на 10–40% в зависимости от вида животных, при этом максимальные значения зафиксированы у поросят — прирост составил 40,95% ($p < 0,001$) к 60-му дню эксперимента. Исследование выявило значительное повышение лизоцимной активности сыворотки крови, достигающее у телят Бессоновской породы 70,27% ($p < 0,001$) к окончанию периода наблюдения. Наиболее ранний ответ отмечен со стороны бактерицидной активности, где статистически значимые различия с контролем регистрировались уже на 3-й день у телят и на 10-й день у поросят, с максимальным приростом показателя на 43,15% ($p < 0,001$).

Ключевые слова: таргетные пробиотики, функциональные кормовые добавки, гепатопротекторы, фагоцитарная активность, лизоцимная активность, бактерицидная активность, факторы естественной резистентности животных

Для цитирования: Севастьянова Т.В., Уша Б.В., Носков С.Б., Альшевская А.А. Влияние функциональных таргетных пробиотиков на показатели неспецифической резистентности молодняка сельскохозяйственных животных. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 22–32. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-22-32>

The effect of functional targeted probiotics on the indicators of nonspecific resistance in young farm animals

ABSTRACT

The article examines the relationship between the “gut — liver” axis and the mechanisms of influence of functional targeted probiotics on the indicators of nonspecific resistance of farm animals. During evolution, animals have developed a multi-level defense system against environmental factors, the leading component of which is the immune system. This system recognizes pathogen-associated molecular patterns and initiates innate and adaptive immune responses. Of particular importance are phagocytosis and humoral factors of natural resistance (lysozyme, properdin, bactericidal activity of blood serum), as well as the intestinal microbiota, which regulates immune homeostasis within the framework of the “gut — liver” axis. The obtained experimental data demonstrate a pronounced immunomodulatory effect, manifested in a significant increase in the phagocytic activity of neutrophils by 10–40%, depending on the animal species. The maximum values were recorded in piglets, with an increase of 40.95% ($p < 0.001$) by the 60th day of the experiment. The study revealed a significant increase in the lysozyme activity of blood serum, reaching 70.27% ($p < 0.001$) in Bessonovka calves by the end of the observation period. The earliest response was noted in bactericidal activity, where statistically significant differences from the control group were recorded as early as day 3 in calves and day 10 in piglets, with a maximum increase in the indicator of 43.15% ($p < 0.001$).

Key words: targeted probiotics, functional feed additives, hepatoprotectors, phagocytic activity, lysozyme activity, bactericidal activity, and natural resistance factors in animals

For citation: Sevastyanova T.V., Usha B.V., Noskov S.B., Alshevskaya A.A. The effect of functional targeted probiotics on the indicators of nonspecific resistance in young farm animals. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 22–32 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-22-32>

Введение/Introduction

Гастроинтестинальный тракт — самый большой иммунный орган млекопитающих, около 25% его слизистой оболочки состоит из иммунологически активной ткани, на которой локализованы около 80% иммунокомпетентных клеток. Основными элементами иммунной системы гастроинтестинального тракта являются лимфоидные клетки (В- и Т-лимфоциты), плазматические клетки, миелоидные клетки (макрофаги, нейтрофилы, эозинофилы), энтероциты, фолликул-ассоциированные специализированные эпителиальные клетки (М-клетки), при этом лимфоцитам принадлежит ключевая роль в осуществлении таких процессов, лежащих в основе иммунитета, как распознавание антигена, удаление его из организма, запоминание контакта с антигеном.

Основными функциями кишечной микрофлоры являются: антагонистическая функция, при которой пристеночная микрофлора, повышая колонизационную резистентность, предупреждает заселение патогенной и условно-патогенной микрофлорой; ферментопродуцирующая функция, обеспечивающая гидролиз клетчатки, белков, жиров, крахмала, деконъюгацию желчных кислот; метаболическая функция формирует синтез витаминов группы В, С, К, аминокислот, холестерина, мочевой кислоты, органических кислот, усвоение солей Са, витамина D; иммуномодулирующая функция, при которой нормофлора поддерживает синтез иммуноглобулинов, опосредует созревание и функционирование иммунокомпетентных органов.

Кроме того, резидентная микрофлора стимулирует образование В-лимфоцитов, плазматических клеток, регулирует содержание лизоцима, пропердина, комплемента и его фракций, способствует развитию и созреванию собственно иммунной системы кишечника и при этом повышает защитные свойства слизистой оболочки кишечника, стимулирует иммунный ответ, повышает фагоцитарную активность, увеличивает содержание IgA, Т-хелперов [1].

Кишечная микрофлора обеспечивает ключевые сигналы для созревания иммунной системы и активно контролирует связанный с кишечником иммунный гомеостаз.

Слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта относится к одному из независимых компонентов иммунной системы и обладает собственной лимфоидной тканью, известной как ассоциированная с желудочно-кишечным трактом лимфоидная ткань (gut-associated lymphoid tissue, GALT). GALT является одним из самых значимых компонентов иммунной системы макроорганизма. При нормальном ее функционировании растворимые бактериальные субстанции и частички размером до 150 мкм, а также бактерии проникают в GALT двумя путями — в результате персорбции и за счет их транспортировки специальными М-клетками, расположенными в слизистой оболочке кишечника.

Бактериальные антигены в начале презентуются Т-хелперам (CD4) и макрофагам, которые инициируют синтез цитокинов. Последние одновременно с антигенами активируют незрелые В-лимфоциты с последующей миграцией их из стенки кишки в лимфу, лимфатические узлы, селезенку, в которых происходят их активная пролиферация, созревание и трансформация в плазматические клетки, синтезирующие секреторный IgA (sIgA). В последующем зрелые лимфоциты и плазматические клетки с током крови расселяются во все слизистые оболочки организма, и до 80% их количества возвращается обратно в гастроинтестинальный тракт (homing-эффект), где они обеспечивают адекватный синтез sIgA и повышают колонизационную резистентность слизистой оболочки [2].

Основным иммуноглобулином кишечника является IgA, который вырабатывается плазматическими клетками, находящимися в пластинке кишечника. Собственная пластинка слизистой оболочки кишечника — это тонкий слой соединительной ткани, который находится под эпителием органа. Вместе эпителий и собственная пластинка образуют слизистую оболочку. Секреторный IgA связывает антигены вирусов и бактерий (нейтрализация вирусов, агглютинация бактерий), блокирует адгезию вирусов и бактерий к слизистой оболочке, стимулируя антибактериальную активность фагоцитов, лимфоцитов в отношении патогенных бактерий, связывает пищевые антигены и аллергены, способные провоцировать аллергические реакции [3, 4].

В ходе эволюции у животных сформировалась многофакторная защитная реакция организма животных на влияние факторов внешней среды различного генеза, где ведущим механизмом является иммунная система, которая распознает молекулярные структуры бактерий и вирусов, которые обозначены как патоген-ассоциированные молекулярные паттерны. Патоген-ассоциированные паттерны — типовые макромолекулы, свойственные целым группам микроорганизмов. По избирательному распознаванию паттерн-распознающими рецепторами происходит однократная идентификация инфекционного агента.

Эта система работает в совокупности с системой антигенных рецепторов В- и Т-лимфоцитов. Кроме того, в организме животного имеется система межклеточных взаимодействий, базирующаяся на адгезивных молекулах, которые в свою очередь играют ключевую роль в морфогенетических процессах и развитии иммунных защитных реакций [5, 6].

Одним из защитных механизмов является фагоцитоз, при этом фагоцитарные элементы — важнейшая составляющая ретикулоэндотелиальной системы. Гуморальными факторами резистентности являются лизоцим, пропердин и различные термолabile и термостабильные ингибиторы.

Фагоцитарная активность нейтрофилов связана по мере внутриутробного развития плодов с

альфа-, а затем с бета- и гамма-глобулинами. Поглощающая активность фагоцитирующих лейкоцитов плодов прямо коррелирует с содержанием в аутосыворотке иммуноглобулина М, комплемента и пропердина и обратно коррелирует с концентрацией лизоцима, в то же время переваривающая способность лейкоцитов прямо зависит от содержания лизоцима.

Бактерицидная активность сыворотки крови — комплексный параметр, отражающий в формализованном виде результат суммарного действия противомикробных факторов естественной резистентности. Лизоцим действует на грамположительные бактерии, комплемент лизирует грамотрицательные бактерии и многие простейшие.

Большая роль в феномене бактерицидной активности сыворотки крови принадлежит клеточным факторам: макрофагам, нейтрофилам и Т-лимфоцитам. Т-лимфоциты регулируют активность макрофагов, которые продуцируют лизоцим, а последний в свою очередь усиливает бактерицидность секреторных иммуноглобулинов. В плазму крови лизоцим поступает при распаде лейкоцитов и тканей. Концентрация его в плазме крови зависит от соотношения между основными продуцентами — нейтрофилами и моноцитами и функцией почек, которые его элиминируют. Моноциты и макрофаги тканей способны синтезировать лизоцим, гранулоциты содержат эндогенный фермент, но не секретируют его.

Накоплен огромный материал, свидетельствующий об участии лизоцима в регуляции иммунных и метаболических процессов. Установлено, что лизоцим инициирует синтез лимфокинов, принимающих участие в регуляции роста клеток и их дифференцировки. Естественная резистентность организма животного может зависеть от множества факторов: перемещения и транспортировка, условий содержания животных, рационального кормления, моциона и даже различного состава воды, почвы [7].

Гастроинтестинальный тракт является полифункциональной системой, осуществляющей многочисленные функции, где происходит нейтрализация чужеродных бактериальных или вирусных антигенов, различных токсинов и ксенобиотиков, а также формирование толерантности и от которой зависит их элиминация. Кишечная микробиота — основной сигнальный интерфейс, который регулирует многоосевую систему организма животного и направляет иммунитет либо на восстановление, либо на манифестацию болезни.

Исходя из многоосевой направленности взаимодействия кишечника с другими органами и системами, возникли концепция таргетных пробиотиков и идея разработки функциональных кормовых добавок целевого назначения. Таргетные пробиотики — это идентифицируемые на уровне штамма пробиотические микроорганизмы, обладающие иммунорегуляторными, метаболическими, индуцирующими, модулирующими и иными

эффектами, способные оказать конкретное положительное влияние на организм животного.

Заселение гастроинтестинального тракта происходит через молозиво и молоко, которые содержат живые микробы, вирусы, археи, их метаболиты, секреторный IgA (sIgA), иммунные клетки, олигосахара, а также цитокины, которые в свою очередь синергически формируют собственную микробиоту кишечника животного.

В конце вторых суток концентрация в молозиве иммуноглобулинов класса G в 1,8–2,2 раза ниже, класса M — в 3,0 раза ниже, чем в молозиве первого удоя. Основными функциями секреторного IgA являются ингибирование микробной адгезии к эпителию слизистых оболочек и препятствие поступлению потенциально опасных полимеров в жизненно важные органы. Данный класс иммуноглобулинов поддерживает мутуализм с местной микрофлорой. Помимо иммуноглобулинов, в молозиве содержатся и другие антимикробные факторы, повышающие неспецифическую резистентность новорожденных, такие как лизоцим, лактоферрин, пероксидазная система, ксантиноксидаза.

Содержащаяся в молозиве нейраминная кислота, которая является продуктом конденсации D-маннозамина и пировиноградной кислоты, стимулирует рост бифидобактерий, предотвращающих развитие гнилостной микрофлоры и синтезирующих витамины B_1 , B_2 и K, которые необходимы для работы органов пищеварения и кроветворения новорожденных. Полноценное молозиво содержит много витаминов A и E [8, 9].

Известно, что sIgA молока ограничивает иммунную активацию и адгезию микробов путем связывания антигенов корма и микробных антигенов, а присутствие метаболитов, таких как олигосахариды молока, способствует пролиферации компонентов микробиоты, таких как *Bifidobacterium* [10, 11].

Доказано, что микробиота играет критическую роль в развитии вторичной лимфоидной структуры: без микробов отмечаются меньший размер пейеровых бляшек, снижение числа CD4+ Т-клеток и IgA-продуцирующих плазматических клеток. После рождения в кишечнике в результате воздействия комменсалы индуцируют развитие третичных лимфоидных структур — изолированных лимфоидных фолликулов [12–14].

Представители кишечной микробиоты регулируют функцию моноцитов — популяции клеток, участвующих в контроле активности патогенов. При острой инфекции взаимодействие моноцитов с микробиотой гастроинтестинального тракта способствует выработке ими липидного медиатора PGE2, что в свою очередь ограничивает уровень активации повреждающих ткань нейтрофилов.

Гастроинтестинальная нормофлора участвует в синтезе иммуноглобулинов, препятствующих адгезии условно-патогенных микроорганизмов к эпителиоцитам, при этом облигатные микроорганизмы

создают эффект экранирования слизистой кишечника от проникновения условно-патогенных микроорганизмов.

Иммунная система не только контролируется кишечной микробиотой, но и чрезвычайно чувствительна к типу и качеству кормления животных [15, 16]. Так, например, богатый липидами рацион изменяет количественно-качественные характеристики микробиоты в сторону штаммов, утилизирующих энергию, и провоцирует энтериты и колиты, а дефицит такого нутриента, как витамин А, необходимого для индукции защитного иммунитета, может напрямую влиять на потребность и усвояемость корма, что в свою очередь доказано на экспериментальной модели с отсутствием В-клеток, и, наоборот, дефицит рецептора бактериального флагеллина TLR5 способствует развитию дисбиоза [10–14].

Мишени для таргетных функциональных пробиотиков могут быть самыми разными — от молекулярных, клеточных, тканевых и органных структур организма животного до микроорганизмов и биопленок, связанных с этиопатогенезом заболевания [17, 18].

В рамках создания функциональных кормовых добавок для сельскохозяйственных животных было предложено акцентировать внимание на оси «кишечник — печень» ввиду возможного усиления действия на факторы неспецифической резистентности молодняка за счет потенцированного влияния комбинированного состава добавок на кишечно-печеночную рециркуляцию, что отражается в повышении различных видов биологической активности сыворотки крови сельскохозяйственных животных [19–24].

Цель исследования — научное обоснование применения таргетных пробиотических композиций для повышения естественной резистентности молодняка сельскохозяйственных животных.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Работу проводили в соответствии с научной тематикой № FGGS-2022-0004 ФГБНУ ВНИТИБП и научно-исследовательской работы на кафедре внутренних незаразных болезней ФГБОУ ВО «Университет пищевых производств» на базе ФГБУ ВГНКИ и ФГБУ «Белгородская МВЛ».

Все исследования проводили общепринятыми стандартными методиками.

Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Fig. 1. Scheme of the experiment



Кровь отбиралась у животных на 3-й, 10-й, 20-й, 30-й и 60-й день эксперимента. Иммунологические исследования включали оценку фагоцитарной, лизоцимной, бактерицидной активности сыворотки крови. Фагоцитарную активность нейтрофилов крови телят и поросят изучали на модели фагоцитоза бактерий¹. Принцип метода основан на визуальном учете количества бактерий, поглощенных нейтрофилами или другими клетками крови животных, в процессе совместного инкубирования жизнеспособных тест-микробов и лейкоцитов в опытах *in vitro*. Лизоцимную активность определяли турбидиметрическим методом по методу Д.Г. Дорофейчук², а бактерицидную активность сыворотки крови животных — по методу Смирнова³.

Опытные группы формировали по принципу аналогов с учетом живой массы и физиологического состояния животных, что отражено на рисунке 1 и в таблице 1. Кормление молодняка животных проводили одинаковыми по видовому и количественному составу кормов рационами⁴. При этом животным опытных групп включали в состав рациона разработанные отечественные функциональные кормовые добавки «Биопротектин КД порошок» и «Биопротектин КД гранулы», «Биопротект КД паста» и «Биопротект КД эмульсия» собственной разработки.

Животные контрольной группы получали только основной рацион.

Исследования проводили на телятах-молочниках Бессоновского типа, созданного на базе племенного комплекса «Бессоновский», на поросятах-отъемышах трехпородного гибрида (крупная белая, ландрас и дюрок), созданного на базе племенного репродуктора «Чайки» колхоза им. Фрунзе Белгородского района Белгородской области Российской Федерации и телятах-молочниках породы герефорд КФХ «А.С. Кузнецов» Новосибирской области Российской Федерации^{5, 6}.

«Биопротектин КД порошок» — кормовая добавка, в состав которой входит экстракт расторопши

¹ Гостев В.С. Естественная резистентность организма животных. Л.: Колос. 1950; 24–27.

² Дорофейчук В.Г. Определение активности лизоцима нефелометрическим методом. Лабораторное дело. 1968; 1: 12.

³ Смирнова О.В., Кузьмина Т.А. Определение бактерицидной активности сыворотки крови методом фотонейфелометрии. ЖМЭИ. 1966; 4: 8–11.

⁴ Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А.П. Калашников, В.И. Фисинин, В.В. Щеглов и др. 3-е изд. (перераб. и доп.). М.: Знание. 2003; 456.

ISBN 5-94587-093-5, EDN PXQMHL

⁵ 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

⁶ 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».

Таблица 1. Схема проведения эксперимента

Table 1. Scheme of the experiment

Группы животных	Кормовой рацион	Норма ввода КД	Кол-во дней	Исследуемые показатели
Телята $n = 45$				
Опыт 1-й, 2-й	ОР + «Биопротектин КД» (порошок и гранулы)	3,6 г/кг x 1 р/сут	60	Фагоцитарная, бактерицидная, лизоцимная активность сыворотки крови
Опыт 1-й, 2-й	ОР + «Биопротект КД паста» ОР + «Биопротект КД эмульсия»	15 г/гол x 1 р/сут 9 г/гол x 1 р/сут		
Контроль	ОР	–		
Поросята $n = 15$				
Опыт 1-й	Молозиво, молоко, ОР + «Биопротектин КД порошок»	2 г/кг x 1 р/сут	60	Фагоцитарная, бактерицидная, лизоцимная активность сыворотки крови
Опыт 2-й	Молозиво, молоко, ОР + «Биопротектин КД гранулы»	2 г/кг x 1 р/сут		
Контроль	ОР	-		

пятнистой — концентрированная форма флаволигнанов.

«Биопротектин КД гранулы» — кормовая добавка, в состав которой входит шрот расторопши пятнистой (это продукт, получаемый из перемолотых семян расторопши с применением холодного отжима, который содержит большое количество клетчатки, витаминов, минералов, флавоноидов и комплекс лакто- и бифидобактерий).

«Биопротект КД паста» — кормовая добавка, в состав которой входят экстракт расторопши пятнистой, гидрогельметилкремниевой кислоты и комплекс лакто- и бифидобактерий.

«Биопротект КД эмульсия» — кормовая добавка, в состав которой входят масло расторопши пятнистой и комплекс лакто- и бифидобактерий.

Статистическую обработку выполняли методами вариационной статистики с использованием пакетов Statistica 13.0 (TIBCO Software Inc., США), GraphPad Prism 9.0 (GraphPad Software, LLC, Dotmatics, США) и Python (numpy, pandas, matplotlib, seaborn) (правообладатели SciPy, Уэс Маккинни, Дж.Д. Хантер, М. Вашберн соответственно).

Данные представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка среднего ($M \pm SEM$).

Для оценки различий между независимыми группами применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). В случае когда анализ выявлял статистически значимые межгрупповые различия, проводили попарные сравнения с использованием t-теста Уэлча для независимых выборок.

Для учета множественных сравнений применяли поправку Holm — Bonferroni. Уровень статистической значимости принимался при $p < 0,05$.

Для оценки влияния факторов «группа» и «время» применяли двухфакторную ANOVA. Статистически значимыми считались различия при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Показатели естественной резистентности и их изменчивость во временном аспекте позволяют оценить влияние кормовых добавок на состояние организма животных. Полученные результаты свидетельствуют о том, что основные параметры клеточного иммунитета молодняка всех исследуемых групп находились в прямой зависимости от продолжительности введения кормовых добавок и возрастного развития животных, достигая максимальных значений к окончанию эксперимента, что отражено в таблицах 2–4 и на рисунках 3–5.

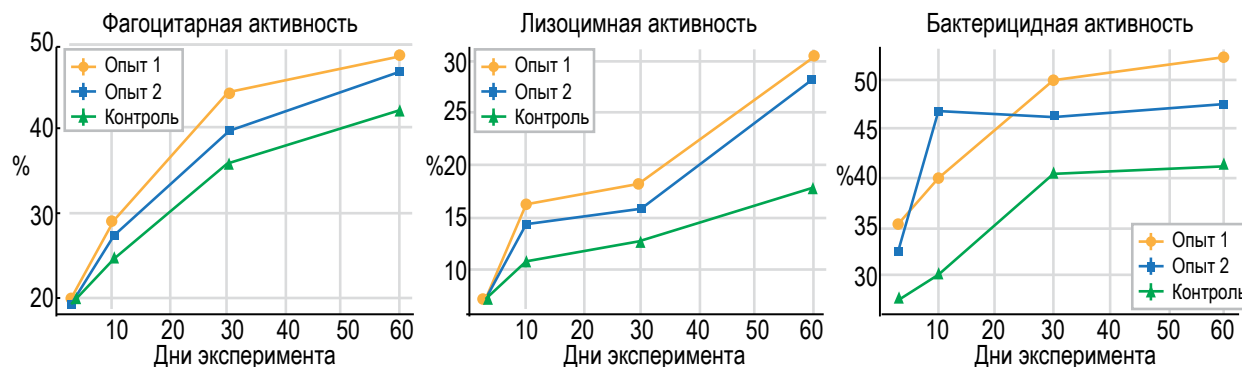
Анализ динамики фагоцитарной активности нейтрофилов показал, что на ранних сроках

Таблица 2. Влияние кормовых добавок «Биопротектин КД порошок» (опыт 1-й) и «Биопротектин КД гранулы» (опыт 2-й) на показатели неспецифической резистентности телят Бессоновской породы молочного направления с 3-го по 60-й день жизни ($n = 15$)

Table 2. The effect of feed additives “Bioprotectin CD powder” (experiment 1) and “Bioprotectin CD granules” (experiment 2) on the indicators of nonspecific resistance of calves of the Bessonov breed of dairy from the 3rd to the 60th day of life ($n = 15$)

Показатели биологической активности крови	Продолжительность эксперимента, дн.											
	Опыт 1-й				Опыт 2-й				Контроль			
	3	10	30	60	3	10	30	60	3	10	30	60
Фагоцитарная активность, %	20,11 $\pm$ 0,01	29,04 $\pm$ 0,06*	44,25 $\pm$ 0,02**	48,46 $\pm$ 0,07*	19,91 $\pm$ 0,04	27,19 $\pm$ 0,07*	39,91 $\pm$ 0,08*	46,46 $\pm$ 0,06*	19,75 $\pm$ 0,05	24,76 $\pm$ 0,07	35,80 $\pm$ 0,04	20,11 $\pm$ 0,01
Разница с контролем, %	1,82	17,28	23,60	15,21	0,86	10,21	11,45	10,53	–	–	–	1,82
Лизоцимная активность, %	7,16 $\pm$ 0,02	16,09 $\pm$ 0,04**	18,07 $\pm$ 0,02**	30,20 $\pm$ 0,03**	7,27 $\pm$ 0,02	14,29 $\pm$ 0,05**	15,87 $\pm$ 0,09**	28,17 $\pm$ 0,04**	7,15 $\pm$ 0,01	10,80 $\pm$ 0,09	12,71 $\pm$ 0,03	7,16 $\pm$ 0,02
Разница с контролем, %	–	48,88	42,17	70,27	1,67	32,22	24,78	58,82	–	–	–	–
Бактерицидная активность, %	35,03 $\pm$ 0,03**	40,04 $\pm$ 0,04**	50,01 $\pm$ 0,02**	52,28 $\pm$ 0,05**	32,05 $\pm$ 0,04*	37,90 $\pm$ 0,05**	46,24 $\pm$ 0,03*	47,59 $\pm$ 0,04*	27,70 $\pm$ 0,07	30,00 $\pm$ 0,05	40,30 $\pm$ 0,04	35,03 $\pm$ 0,03**
Разница с контролем, %	27,38	33,55	24,09	26,92	16,54	55,73	14,73	15,51	–	–	–	27,38

Примечание: значения представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка среднего ($M \pm m$), $n = 5$. Для оценки межгрупповых различий использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующими попарными сравнениями по t-тесту Уэлча для независимых выборок. Для учета множественных сравнений применяли поправку Holm — Bonferroni; * различие статистически значимо по сравнению с контролем при $p < 0,05$; ** различие статистически значимо по сравнению с контролем при $p < 0,01$.

Рис. 2. Динамика показателей иммунологической активности крови телят**Fig. 2.** Dynamics of immunological activity indicators in calf blood

эксперимента (3-й день у телят, 10-й день у поросят) статистически значимых различий между опытными и контрольными группами выявлено не было. Значения в обеих породах телят и у поросят находились в пределах физиологической нормы. Так, у телят Бессоновской породы на 3-й день показатель фагоцитарной активности составлял $20,11 \pm 0,01\%$ в группе, получавшей «Биопротектин КД порошок», $19,91 \pm 0,04\%$ — «Биопротектина КД гранулы», тогда как в контроле — $19,75 \pm 0,05\%$ ($p > 0,05$).

У герефордских телят в этот же срок активность нейтрофилов составила $29,36 \pm 0,83\%$ и $28,39 \pm 0,73\%$ против $27,19 \pm 0,68\%$ в контроле (разница 4–8%, $p > 0,05$).

У поросят на 10-й день показатель в опытных группах составил $18,16 \pm 0,02\%$ и $18,12 \pm 0,03\%$ соответственно, что лишь незначительно превышало контрольное значение $16,75 \pm 0,05\%$ (разница 8%, $p > 0,05$). Эти данные подтверждают, что в раннем возрасте стимулирующий эффект кормовых добавок еще не реализуется.

К 10-му дню опыта у телят Бессоновской породы наблюдали статистически значимое повышение фагоцитарной активности: $29,04 \pm 0,06\%$ и $27,19 \pm 0,07\%$ против контрольных $24,76 \pm 0,07\%$ (разница 10–17%, $p < 0,05$). У герефордских телят различия становились выраженными — соответственно, $31,96 \pm 0,74\%$ и $29,82 \pm 0,77\%$ против $27,89 \pm 0,81\%$ в контроле (разница 7–15%, $p < 0,05$). У поросят на 20-й день показатель достигал $26,16 \pm 0,03\%$ и $26,13 \pm 0,04\%$ при контроле $21,76 \pm 0,17\%$ (разница около 21%, $p < 0,01$). Таким образом, именно к 10–20-му дню можно фиксировать начало статистически значимого стимулирующего эффекта кормовых добавок.

К 30-му дню различия усиливались во всех группах. У телят Бессоновской породы показатели составили $44,25 \pm 0,02\%$ и $39,91 \pm 0,08\%$ соответственно, что статистически значимо превышало при контроле $35,80 \pm 0,04\%$ (разница 11–24%, $p < 0,01$). У герефордских телят аналогичные показатели достигали $45,93 \pm 0,07\%$ и $44,65 \pm 0,12\%$ против контроля $37,72 \pm 0,36\%$ (разница 21–24%, $p < 0,01$). У поросят в этот срок активность составила $33,69 \pm 0,09\%$ и $34,11 \pm 0,04\%$ соответственно,

что также статистически значимо превышало при контроле $27,99 \pm 0,07\%$ (разница около 21%, $p < 0,01$).

Максимальные различия наблюдали к 60-му дню. У телят Бессоновской породы фагоцитарная активность достигала $48,46 \pm 0,07\%$ и $46,46 \pm 0,06\%$ против $35,80 \pm 0,04\%$ при контроле (разница 15–26%, $p < 0,01$). У герефордских телят показатели составили $49,45 \pm 0,09\%$ и $48,04 \pm 0,32\%$, что статистически значимо превышало контрольное значение $40,93 \pm 0,37\%$ (разница 17–21%, $p < 0,01$). У поросят активность достигала максимальных значений — $58,59 \pm 0,06\%$ и $58,49 \pm 0,07\%$ соответственно, что превышало контрольный показатель $41,56 \pm 0,02\%$ более чем на 40% ($p < 0,001$).

Таким образом, динамика фагоцитарной активности указывает на поэтапное формирование стимулирующего эффекта кормовых добавок: отсутствие различий на ранних сроках, статистически значимое повышение у телят уже к 10-му дню, у поросят — к 20-му, достижение максимальных различий к 60-му дню. Наиболее выраженное усиление фагоцитарной активности наблюдали у поросят, где прирост относительно контроля составил свыше 40% ($p < 0,001$), тогда как у телят обеих пород эффект был умеренно выраженным (10–24%, $p < 0,01$).

На начальном этапе эксперимента существенных различий между группами не выявлялось. Так, у телят Бессоновской породы на 3-й день показатель лизоцимной активности составлял $7,16 \pm 0,02\%$ и $7,27 \pm 0,02\%$, что полностью соответствовало контрольному значению $7,15 \pm 0,01\%$ ($p > 0,05$). У герефордских телят активность нейтрофилов в этот срок достигала $8,63 \pm 0,18\%$ и $8,56 \pm 0,20\%$, что лишь на 10–11% превышало при контроле $7,76 \pm 0,21\%$ ($p > 0,05$). У поросят на 10-й день опытные значения составили $11,13 \pm 0,03\%$ и $11,46 \pm 0,05\%$ при контрольном уровне $10,43 \pm 0,03\%$ (разница 7–10%, $p > 0,05$). Эти данные показывают, что в ранние сроки действие кормовых добавок на лизоцимную активность еще не реализуется.

К 10-му дню опыта у телят Бессоновской породы выявлялось статистически значимое повышение показателя: $16,09 \pm 0,04\%$ и $14,29 \pm 0,05\%$

против контроля $10,80 \pm 0,09\%$ (разница 32–49%, $p < 0,01$). У герефордских телят в этот же срок активность достигала $17,79 \pm 0,12\%$ и $17,33 \pm 0,25\%$ против $15,36 \pm 0,68\%$ в контроле (разница 13–16%, $p < 0,05$). У поросят статистически значимое различие проявлялось к 20-му дню: $18,29 \pm 0,07\%$ и $21,12 \pm 0,08\%$ против $16,11 \pm 0,09\%$ в контроле (разница 14–31%, $p < 0,05$ – $0,001$).

К 30-му дню различия усиливались. У телят Бессоновской породы лизоцимная активность составила $18,07 \pm 0,02\%$ и $15,87 \pm 0,09\%$ при контроле $12,71 \pm 0,03\%$ (разница 25–42%, $p < 0,01$). У герефордских телят значения достигали $19,96 \pm 0,07\%$ и $19,64 \pm 0,08\%$ против контроля $17,68 \pm 0,26\%$ (разница 11–13%, $p < 0,05$). У поросят показатель составил $24,15 \pm 0,09\%$ и $24,81 \pm 0,08\%$, что статистически значимо превышало контроль $18,71 \pm 0,04\%$ на 29–33% ($p < 0,01$ – $0,001$).

К 60-му дню опытные группы демонстрировали максимальные различия. У телят Бессоновской породы значения достигали $30,20 \pm 0,03\%$ и $28,17 \pm 0,04\%$, что превышало контроль $12,71 \pm 0,03\%$ на 58–70% ($p < 0,001$). У герефордских телят активность составила $33,30 \pm 0,38\%$ и $31,98 \pm 0,35\%$ против $27,43 \pm 0,04\%$ в контроле (разница 17–21%, $p < 0,01$). У поросят показатель увеличивался до $35,86 \pm 0,11\%$ и $36,60 \pm 0,09\%$ против контроля $29,02 \pm 0,03\%$ (разница 23–26%, $p < 0,01$).

Таким образом, динамика лизоцимной активности отражает постепенное нарастание стимулирующего эффекта кормовых добавок у всех исследованных животных. Если на ранних сроках различий не наблюдали, то к 10–20-му дню формировались статистически значимые различия, а к 60-му дню прирост активности составлял 20–70% в зависимости от вида животных.

Наиболее выраженный эффект наблюдали у телят Бессоновской породы, где разница с контролем достигала 70% ($p < 0,001$), что указывает на высокую чувствительность этого показателя к действию пробиотических добавок.

На ранних сроках эксперимента различия между группами начинали проявляться более отчетливо, чем по другим показателям. Так, у телят Бессоновской породы на 3-й день

бактерицидная активность крови составила $35,03 \pm 0,03\%$ и $32,05 \pm 0,04\%$ в опытных группах против $27,70 \pm 0,07\%$ в контроле, что соответствовало приросту 17–27% ($p < 0,05$ – $0,01$). У герефордских телят в этот же срок показатели достигали $35,09 \pm 0,19\%$ и $34,78 \pm 0,19\%$ при контроле $31,56 \pm 0,11\%$ (разница 10–11%, $p < 0,05$). У поросят на 10-й день опытные группы характеризовались значениями $38,58 \pm 0,11\%$ и $38,13 \pm 0,08\%$, тогда как контрольная группа — $26,95 \pm 0,08\%$ (разница 41–43%, $p < 0,001$). Таким образом, бактерицидная активность демонстрировала наиболее ранний и выраженный ответ на применение кормовых добавок.

К 10-му дню опыта у телят Бессоновской породы показатель достигал $40,04 \pm 0,04\%$ и $37,90 \pm 0,05\%$ против контроля $30,00 \pm 0,05\%$ (разница 27–33%, $p < 0,01$ – $0,001$). У герефордских телят активность составляла $41,71 \pm 0,21\%$ и $40,21 \pm 0,41\%$ при контроле $37,59 \pm 0,83\%$ (разница 7–11%, $p < 0,05$). У поросят в этот срок показатель увеличивался до $40,78 \pm 0,07\%$ и $39,12 \pm 0,06\%$, что статистически значимо превышало контроль $29,98 \pm 0,06\%$ на 30–36% ($p < 0,001$). К 30-му дню различия усиливались. У телят Бессоновской породы активность составила $50,01 \pm 0,02\%$ и $46,24 \pm 0,03\%$ против контроля $40,30 \pm 0,04\%$ (разница 15–24%, $p < 0,01$). У герефордских телят показатели достигали $50,83 \pm 0,28\%$ и $48,97 \pm 0,10\%$ при контроле $41,22 \pm 0,48\%$ (разница 16–23%, $p < 0,01$). У поросят бактерицидная активность возрастала до $48,27 \pm 0,05\%$ и $48,14 \pm 0,06\%$ против $34,89 \pm 0,06\%$ в контроле, что соответствовало приросту около 38% ($p < 0,001$).

Максимальные различия фиксировались к 60-му дню. У телят Бессоновской породы показатели составили $52,28 \pm 0,05\%$ и $47,59 \pm 0,04\%$ при контроле $40,30 \pm 0,04\%$, что соответствовало приросту 15–27% ($p < 0,01$). У герефордских телят активность достигала $53,50 \pm 0,20\%$ и $50,68 \pm 0,26\%$ против контроля $42,19 \pm 0,23\%$ (разница 20–27%, $p < 0,01$).

У поросят бактерицидная активность составляла $50,12 \pm 0,06\%$ и $49,27 \pm 0,07\%$, что превышало контроль $38,58 \pm 0,11\%$ на 21–23% ($p < 0,01$) (табл. 3, рис. 3).

Рис. 3. Динамика показателей иммунологической активности крови телят герефордской породы

Fig. 3. Dynamics of biological activity indicators in the blood of Hereford calves

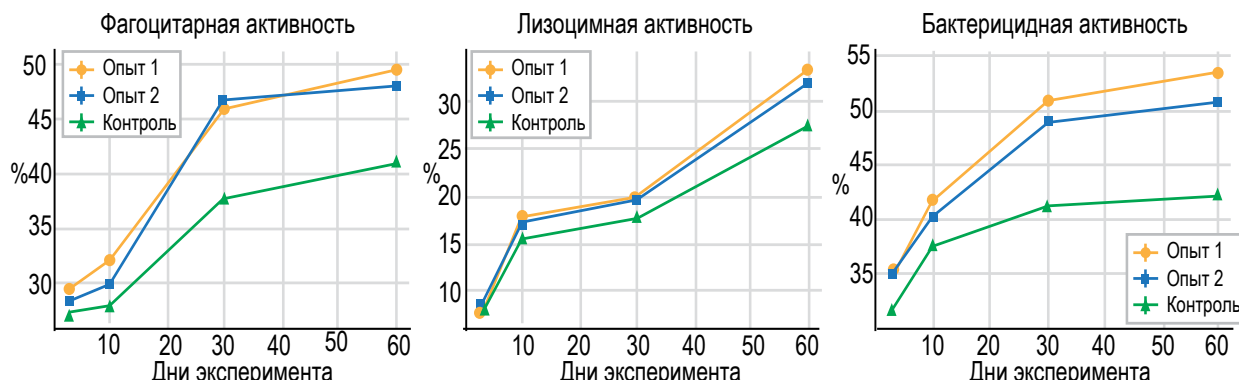


Таблица 3. Влияние кормовых добавок «Биопротект КД паста» (опыт 1-й) и «Биопротект КД эмульсия» (опыт 2-й) на показатели неспецифической резистентности телят герефордской породы мясного направления с 3-го по 60-й день жизни (n = 30)

Table 3. The effect of feed additives “Bioprotect CD paste” (experiment 1) and “Bioprotect CD emulsion” (experiment 2) on the indicators of nonspecific resistance of calves of the Hereford meat breed from the 3rd to the 60th day of life (n = 30)

Показатели биологической активности крови	Продолжительность эксперимента, дн.											
	Опыт 1-й				Опыт 2-й				Контроль			
	3	10	30	60	3	10	30	60	3	10	30	60
Фагоцитарная активность, %	29,35 ± 0,83	31,96 ± 0,7*	45,93 ± 0,0**	49,45 ± 0,09**	28,39 ± 0,73	29,82 ± 0,77	44,65 ± 0,12**	48,04 ± 0,32*	27,19 ± 0,68	27,89 ± 0,81	37,72 ± 0,36	29,35 ± 0,83
Разница с контролем, %	7,94	14,55	21,77	20,79	4,41	6,92	23,70	17,37	—	—	—	7,94
Лизоцимная активность, %	8,63 ± 0,18*	17,79 ± 0,12*	19,96 ± 0,07*	33,30 ± 0,38**	8,56 ± 0,20*	17,33 ± 0,25*	19,64 ± 0,08*	31,98 ± 0,35*	7,76 ± 0,21	15,36 ± 0,68	17,68 ± 0,26	8,63 ± 0,18*
Разница с контролем, %	11,08	15,75	12,83	21,40	10,30	12,77	11,08	16,63	—	—	—	11,08
Бактерицидная активность, %	35,09 ± 0,19*	41,71 ± 0,21*	50,83 ± 0,28**	53,50 ± 0,20**	34,78 ± 0,19*	40,21 ± 0,41	48,97 ± 0,10*	50,68 ± 0,26**	31,56 ± 0,11	37,59 ± 0,83	41,22 ± 0,48	35,09 ± 0,19*
Разница с контролем, %	11,15	10,96	23,28	26,80	10,20	6,97	16,29	20,09	—	—	—	11,15

Примечание: значения представлены как среднее ± стандартная ошибка среднего ($M \pm m$), n = 30. Для оценки различий использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующими попарными сравнениями по t-тесту Уэлча; поправка Holm — Bonferroni для множественных сравнений; * p < 0,05 (различие с контролем статистически значимо); ** p < 0,01.

Таблица 4. Влияние кормовых добавок «Биопротектин КД порошок» (опыт 1-й) и «Биопротектин КД гранулы» (опыт 2-й) на показатели неспецифической резистентности поросят с 10-го по 60-й день жизни (n = 15)

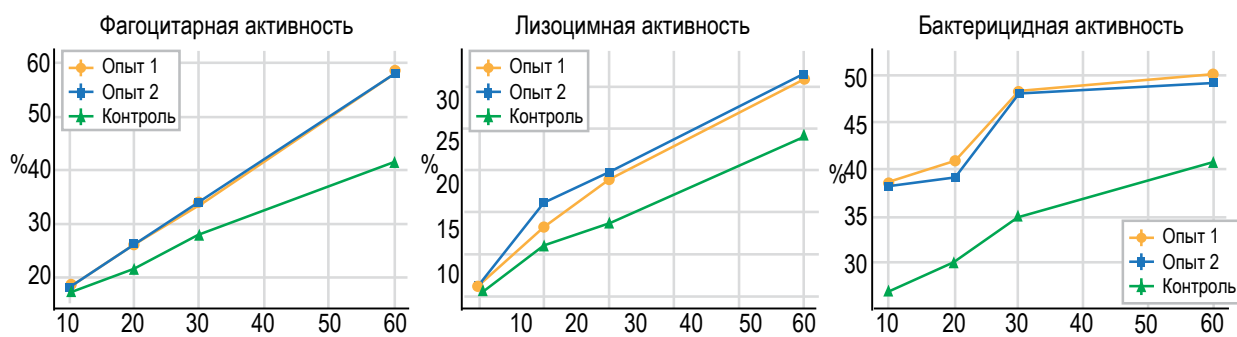
Table 4. Effect of feed additives “Bioprotectin CD powder” (experiment 1) and “Bioprotectin CD granules” (experiment 2) on indicators of nonspecific resistance of piglets from the 10th to the 60th day of life (n = 15)

Показатели биологической активности крови	Продолжительность эксперимента, дн.											
	Опыт 1-й				Опыт 2-й				Контроль			
	10	20	30	60	10	20	30	60	10	20	30	60
Фагоцитарная активность, %	18,16 ± 0,02*	26,16 ± 0,03**	33,69 ± 0,09**	58,59 ± 0,06***	18,12 ± 0,03*	26,13 ± 0,04**	34,11 ± 0,04**	58,49 ± 0,07***	16,75 ± 0,05	21,76 ± 0,17	27,99 ± 0,07	18,16 ± 0,02*
Разница с контролем, %	8,43	20,2	20,3	41,2	8,2	20,1	21,8	40,9	—	—	—	8,43
Лизоцимная активность, %	11,13 ± 0,03**	18,29 ± 0,07**	24,15 ± 0,09***	35,86 ± 0,11***	11,46 ± 0,05**	21,12 ± 0,08***	24,81 ± 0,08***	36,60 ± 0,09***	10,43 ± 0,03	16,11 ± 0,09	18,71 ± 0,04	11,13 ± 0,03**
Разница с контролем, %	6,7	13,5	29,0	23,6	9,9	31,2	32,6	26,1	—	—	—	6,7
Бактерицидная активность, %	38,58 ± 0,11***	40,78 ± 0,07***	48,27 ± 0,05***	50,12 ± 0,06**	38,13 ± 0,08***	39,12 ± 0,06***	48,14 ± 0,06***	49,27 ± 0,07**	26,95 ± 0,08	29,98 ± 0,06	34,89 ± 0,06	38,58 ± 0,11***
Разница с контролем, %	43,1	36,1	38,3	22,8	41,4	30,5	37,9	20,6	—	—	—	43,1

Примечание: * значения представлены как среднее ± стандартная ошибка среднего ($M \pm m$), n = 10. Для оценки различий использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующими попарными сравнениями по t-тесту Уэлча; поправка Holm — Bonferroni для множественных сравнений; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Рис. 4. Динамика формирования биологической активности крови поросят

Fig. 4. Dynamics of the formation of biological activity in piglets' blood



Таким образом, бактерицидная активность крови животных во всех группах демонстрировала более быстрый и выраженный ответ на применение кормовых добавок по сравнению с другими параметрами. Уже в ранние сроки (3-й день у телят, 10-й день у поросят) выявлялись статистически

значимые различия с контролем, которые достигали максимума к 30–60-му дню.

Наиболее выраженный эффект наблюдали у поросят, где прирост бактерицидной активности по сравнению с контролем достигал 40% уже к 10-му дню (p < 0,001) (табл. 4, рис. 4).

Динамика фагоцитарной активности отражает постепенное формирование стимулирующего действия кормовых добавок: на ранних сроках достоверных различий между группами не наблюдалось, однако к 10-му дню у телят и к 20-му дню у поросят было выявлено статистически значимое повышение активности, а к 60-му дню показатели достигали максимальных значений. Это подтверждает модулирующее влияние пробиотиков на фагоцитарное звено клеточного иммунитета у молодняка.

Лизоцимная активность возрастала более постепенно, но уже к 10–20-му дню формировались статистически значимые различия между опытными и контрольными группами, а к 60-му дню прирост показателя достигал 20–70% в зависимости от вида животных. Наиболее выраженный эффект отмечали у телят Бессоновской породы, что свидетельствует о высокой чувствительности этого показателя к действию кормовых добавок и о включении макрофагального звена в иммунный ответ.

Бактерицидная активность характеризовалась наиболее ранним и выраженным ответом: статистически значимые различия фиксировались уже на 3-й день у телят и на 10-й день у поросят, а к 30–60-му дню превышение контрольных значений достигало 15–40%. Особенно интенсивный эффект наблюдали у поросят, что указывает на особую значимость данного параметра как маркера иммуномодулирующего действия кормовых добавок. Следует учитывать, что повышение бактерицидной активности является следствием активации комплемента по альтернативному пути, в результате чего фрагменты C3b связываются с поверхностью микробных клеток и инициируют формирование мембраноатакующего комплекса (MAC), приводящего к повреждению и гибели микроорганизмов.

Таким образом, совокупность полученных результатов свидетельствует о том, что введение в рацион таргетных пробиотических кормовых добавок способствует модуляции неспецифической резистентности животных, обеспечивая статистически значимое усиление клеточного иммунного ответа и подтверждая универсальность

выявленного эффекта для молодняка крупного рогатого скота и свиней.

Выводы/Conclusions

На основании проведенных исследований установлено, что применение разработанных комплексных кормовых добавок серии «Биопротектин КД» обеспечивает статистически значимое повышение показателей неспецифической резистентности у молодняка сельскохозяйственных животных. Полученные экспериментальные данные демонстрируют выраженный иммуномодулирующий эффект, проявляющийся в достоверном усилении фагоцитарной активности нейтрофилов на 10–40% в зависимости от вида животных, при этом максимальные значения зафиксированы у поросят — прирост составил 40,95% ($p < 0,001$) к 60-му дню эксперимента.

Исследование выявило значительное повышение лизоцимной активности сыворотки крови, достигающее у телят Бессоновской породы 70,27% ($p < 0,001$) к окончанию периода наблюдения. Наиболее ранний ответ отмечен со стороны бактерицидной активности, где статистически значимые различия с контролем регистрировались уже на 3-й день у телят и на 10-й день у поросят с максимальным приростом показателя на 43,15% ($p < 0,001$).

Динамика изучаемых параметров свидетельствует о постепенном накопительном эффекте кормовых добавок с формированием устойчивого иммуномодулирующего действия к 30–60-м суткам применения. Установлены видовые особенности реагирования: свиньи проявляют более выраженную чувствительность по фагоцитарному показателю, в то время как телята Бессоновской породы демонстрируют максимальный ответ по лизоцимной активности.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования комплексных пробиотических добавок с гепатопротекторными компонентами для модуляции иммунного статуса молодняка и позволяют рекомендовать их включение в схемы профилактики заболеваний в современном животноводстве с целью снижения антибиотической нагрузки и повышения естественной резистентности организма животных.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные.

Севастьянова Т.В. — 70%, Уша Б.В. — 10%, Носков С.Б. — 10%, Альшевская А.А. — 10%.

Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

Sevastyanova T.V. — 70%, Usha B.V. — 10%, Noskov S.B. — 10%, Alshevskaya A.A. — 10%.

The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазарева Т.С., Жвания Ф.Ф. Желудочно-кишечный тракт, микрофлора и иммунитет. *Педиатрическая фармакология*. 2009; 6(1): 46–50. <https://elibrary.ru/knvdqv>
2. Meance S., Cayuela C., Raimondi A., Turchet P., Lucas C., Antoine J.-M. Recent Advances in the Use of Functional Foods: Effects of the Commercial Fermented Milk with Bifidobacterium Animalis Strain DN-173 010 and Yoghurt Strains on Gut Transit Time in the Elderly. *Microbial Ecology in Health and Disease*. 2003; 15(1): 15–22. <https://doi.org/10.1080/08910600310015565>

REFERENCES

1. Lazareva T.S., Zhvania F.F. Gastrointestinal tract, microflora and immunity. *Pediatric pharmacology*. 2009; 6(1): 46–50 (in Russian). <https://elibrary.ru/knvdqv>
2. Meance S., Cayuela C., Raimondi A., Turchet P., Lucas C., Antoine J.-M. Recent Advances in the Use of Functional Foods: Effects of the Commercial Fermented Milk with Bifidobacterium Animalis Strain DN-173 010 and Yoghurt Strains on Gut Transit Time in the Elderly. *Microbial Ecology in Health and Disease*. 2003; 15(1): 15–22. <https://doi.org/10.1080/08910600310015565>

3. Римарчук Г.В. (ред.). Опыт применения «Кипферона» в практике педиатра: факты и комментарии. М.: Анита Пресс. 2008; 31. ISBN 978-5-903124-21-3
<https://elibrary.ru/qmbtor>
4. Мухина Ю.Г., Дубровская М.И., Кафарская Л.И. Иммунная система и микрофлора кишечника у детей. Обоснование функционального питания. *Фарматека*. 2006; (2): 22–28.
5. Головкин А.С., Кудрявцев И.В., Федотов П.А., Калинина О.В. Новые аспекты влияния факторов иммунитета и микробиома на реакции отторжения трансплантированного сердца. *Российский кардиологический журнал*. 2022; 27(8): 135–141.
<https://doi.org/10.15829/1560-4071-2022-4806>
6. Заботина Т.Н. Иммунологические нарушения у онкологических больных как основа таргетной иммунотерапии. *Опухолевые маркеры: фундаментальные и клинические аспекты. Материалы конференции, посвященной памяти советского и российского ученого Г.И. Абелева*. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. 2018; 34–35.
<https://elibrary.ru/yvatjr>
7. Kijner S., Cher A., Yassour M. The Infant Gut Commensal *Bacteroides dorei* Presents a Generalized Transcriptional Response to Various Human Milk Oligosaccharides. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2022; 12: 854122.
<https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.854122>
8. Хавкин А.И., Ситкин С.И. Влияние таргетных пробиотиков на ось «микробиота — кишечник — иммунная система». *Вопросы практической педиатрии*. 2023; 18(6): 107–118.
<https://doi.org/10.20953/1817-7646-2023-6-107-118>
9. de Jong R.J., Ohnmacht C. Defining Dysbiosis in Inflammatory Bowel Disease. *Immunity*. 2019; 50(1): 8–10.
<https://doi.org/10.1016/j.immuni.2018.12.028>
10. Klionsky D.J. *et al.* Guidelines for the use and interpretation of assays for monitoring autophagy (4th edition). *Autophagy*. 2021; 17(1): 1–382.
<https://doi.org/10.1080/15548627.2020.1797280>
11. Woodworth M.H. mSphere of Influence: Microbiome-Associated Phenotypes Are Modifiable. *mSphere*. 2020; 5(4): e00508–e00520.
<https://doi.org/10.1128/mSphere.00508-20>
12. Carbonetto B. *et al.* Human Microbiota of the Argentine Population — A Pilot Study. *Frontiers in Microbiology*. 2016; 7: 51.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00051>
13. Гончарова Г.И. и др. Лечение и профилактика дисбактериоза кишечника бифидумпрепаратами. *Иммунобиологические препараты. Сборник трудов МНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского*. Москва. 1986; 140–146.
14. Косилов В.И., Юлдашбаев Ю.А., Ермолова Е.М., Ермолов С.М., Неверова О.П., Долгая М.Н. Влияние сорбента и пробиотика на продуктивность цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2025; (2): 108–114.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-108-114>
15. Буабенг Э. Взаимосвязь между кишечным микробиомом и иммунитетом телат. *Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год. Сборник трудов конференции*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2025; 205–207.
<https://elibrary.ru/jsdxdy>
16. Sadovaya E.A., Litvinov O.B., Belousova A.R. Effects of probiotic bacteria and yeasts on the immune system. *Global issues conference 2025: Veterinary medicine, Biology, Biotechnology, Zootechnology, Pedagogical and Philological sciences*. Moscow: Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — MVA named after K.I. Skryabin. 2025; 882–888.
<https://elibrary.ru/etxcwb>
17. Turrone F., Duranti S., Milani C., Lugli G.A., van Sinderen D., Ventura M. *Bifidobacterium bifidum*: A Key Member of the Early Human Gut Microbiota. *Microorganisms*. 2019; 7(11): 544.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms7110544>
18. Ивашкин В.Т. и др. Практические рекомендации Научного сообщества по содействию клиническому изучению микробиома человека (НСОИМ) и Российской гастроэнтерологической ассоциации (РГА) по применению пробиотиков, пребиотиков, синбиотиков и обогащенных ими функциональных пищевых продуктов для лечения и профилактики заболеваний гастроэнтерологического профиля у детей и взрослых. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. 2021; 31(2): 65–91.
<https://doi.org/10.22416/1382-4376-2021-31-2-65-91>
19. Жандалгарова А.Д. и др. Влияние иммобилизованной формы пробиотического препарата «Экофлор» на показатели неспецифического гуморального иммунитета осетровых рыб. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2023; (2): 77–84.
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-2-77-84>
3. Rimarchuk G.V. (ed.). Experience in the use of “Kipferon” in the practice of a pediatrician: facts and comments. Moscow: Anita Press. 2008; 31 (in Russian). ISBN 978-5-903124-21-3
<https://elibrary.ru/qmbtor>
4. Mukhina Yu.G., Dubrovskaya M.I., Kafarskaya L.I. Immune system and intestinal microflora in children. Justification of functional nutrition. *Pharmateca*. 2006; (2): 22–28 (in Russian).
5. Golovkin A.S., Kudryavtsev I.V., Fedotov P.A., Kalina O.V. New aspects of the influence of immunity and microbiome on heart transplant rejection. *Russian Journal of Cardiology*. 2022; 27(8): 135–141 (in Russian).
<https://doi.org/10.15829/1560-4071-2022-4806>
6. Zabotina T.N. Immunological disorders in cancer patients as the basis for targeted immunotherapy. *Tumor Markers: Fundamental and Clinical Aspects. Proceedings of the conference dedicated to the memory of the Soviet and Russian scientist G.I. Abelev*. Novosibirsk: Novosibirsk State University. 2018; 34–35 (in Russian).
<https://elibrary.ru/yvatjr>
7. Kijner S., Cher A., Yassour M. The Infant Gut Commensal *Bacteroides dorei* Presents a Generalized Transcriptional Response to Various Human Milk Oligosaccharides. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2022; 12: 854122.
<https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.854122>
8. Khavkin A.I., Sitkin S.I. The effect of targeted probiotics on the microbiota — gut — immune system axis. *Clinical Practice in Pediatrics*. 2023; 18(6): 107–118 (in Russian).
<https://doi.org/10.20953/1817-7646-2023-6-107-118>
9. de Jong R.J., Ohnmacht C. Defining Dysbiosis in Inflammatory Bowel Disease. *Immunity*. 2019; 50(1): 8–10.
<https://doi.org/10.1016/j.immuni.2018.12.028>
10. Klionsky D.J. *et al.* Guidelines for the use and interpretation of assays for monitoring autophagy (4th edition). *Autophagy*. 2021; 17(1): 1–382.
<https://doi.org/10.1080/15548627.2020.1797280>
11. Woodworth M.H. mSphere of Influence: Microbiome-Associated Phenotypes Are Modifiable. *mSphere*. 2020; 5(4): e00508–e00520.
<https://doi.org/10.1128/mSphere.00508-20>
12. Carbonetto B. *et al.* Human Microbiota of the Argentine Population — A Pilot Study. *Frontiers in Microbiology*. 2016; 7: 51.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00051>
13. Goncharova G.I. *et al.* Treatment and prevention of intestinal dysbacteriosis with bifidum preparations. *Immunobiological preparations. Collection of works by G.N. Gabrichievsky Research Institute of Epidemiology and Microbiology*. Moscow. 1986; 140–146 (in Russian).
14. Kosilov V.I., Yuldashbaev Yu.A., Ermolova E.M., Ermolov S.M., Neverova O.P., Dolgaya M.N. The effect of sorbent and probiotic on the productivity of broiler chickens. *Agrarian science*. 2025; (2): 108–114 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-108-114>
15. Buabeng E. The relationship between the intestinal microbiome and immunity in calves. *Collection of articles based on the materials of the annual scientific and practical conference of teachers on the results of research for 2024. Conference proceedings*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2025; 205–207 (in Russian).
<https://elibrary.ru/jsdxdy>
16. Sadovaya E.A., Litvinov O.B., Belousova A.R. Effects of probiotic bacteria and yeasts on the immune system. *Global issues conference 2025: Veterinary medicine, Biology, Biotechnology, Zootechnology, Pedagogical and Philological sciences*. Moscow: Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — MVA named after K.I. Skryabin. 2025; 882–888.
<https://elibrary.ru/etxcwb>
17. Turrone F., Duranti S., Milani C., Lugli G.A., van Sinderen D., Ventura M. *Bifidobacterium bifidum*: A Key Member of the Early Human Gut Microbiota. *Microorganisms*. 2019; 7(11): 544.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms7110544>
18. Ivashkin V.T. *et al.* Practical Recommendations of Scientific Society for the Study of Human Microbiome and the Russian Gastroenterological Association on Use of Probiotics, Prebiotics, Synbiotics and Functional Foods in Treatment and Prevention of Gastroenterological Diseases in Children and Adults. *Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*. 2021; 31(2): 65–91 (in Russian).
<https://doi.org/10.22416/1382-4376-2021-31-2-65-91>
19. Zhandalgarova A.D. *et al.* Influence of immobilized form of probiotic preparation “Ecoflor” on indicators of non-specific humoral immunity of sturgeons. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry*. 2023; (2): 77–84 (in Russian).
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-2-77-84>

20. Топурия Г.М. Влияние пробиотика «Иммунофлор» на пищевую ценность мяса уток. *Аграрная наука*. 2025; (5): 69–74. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-69-74>
21. Ilyashenko A.N. The effect of *Bacillus* in the composition of the probiotic Natupro® against bacterial pathogenic strains *in vitro*. *Аграрная наука*. 2024; (3): 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-80-84>
22. Сафина А.К., Хоггуи М.А., Гайнуллина М.К., Крупин Е.О. Влияние пробиотиков на динамику роста и показатели крови козлят зааненской породы. *Аграрная наука*. 2023; (5): 68–71. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-370-5-68-71>
23. Плотнокова Е.Ю., Захарова Ю.В. Иммуномодулирующие эффекты пробиотиков. *Медицинский совет*. 2020; (15): 135–144. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-15-135-144>
24. Шулпекова Ю.О., Русяев В.Ю. Пробиотики для повседневного приема: польза и обдуманное применение. *Медицинский совет*. 2021; (15): 136–143. <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2021-15-136-143>

20. Topuria G.M. Effect of probiotic “Immunoflor” on nutritional value of duck meat. *Agrarian science*. 2025; (5): 69–74 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-69-74>
21. Ilyashenko A.N. The effect of *Bacillus* in the composition of the probiotic Natupro® against bacterial pathogenic strains *in vitro*. *Agrarian science*. 2024; (3): 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-80-84>
22. Safina A.K., Hoggui M.A., Gainullina M.K., Krupin E.O. Influence of probiotics on growth dynamics and blood parameters of Zaanen goats. *Agrarian science*. 2023; (5): 68–71 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-370-5-68-71>
23. Plotnikova E.Yu., Zakharova Yu.V. Immunomodulatory effects of probiotics. *Medical Council*. 2020; (15): 135–144 (in Russian). <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-15-135-144>
24. Shulpekova Yu.O., Rusyaev V.Yu. Daily probiotics: benefits and reasonable application. *Medical Council*. 2021; (15): 136–143 (in Russian). <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2021-15-136-143>

ОБ АВТОРАХ

Татьяна Владимировна Севастьянова¹

кандидат ветеринарных наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
tatianakenegen@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8264-1156>

Борис Вениаминович Уша²

доктор ветеринарных наук,
профессор, академик РАН
UshaBV@mgupp.ru

Сергей Борисович Носков³

доктор ветеринарных наук, профессор
Noskovvetlab@yandex.ru

Алина Анатольевна Альшевская⁴

кандидат медицинских наук,
старший научный сотрудник
alshevskaya_a_a@staff.sechenov.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7307-4524>

¹Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности, пос. Биокомбината, 17, г. о. Лосино-Петровский, Московская обл., 141142, Россия

²Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),

Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия

³Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, ул. им. Вавилова, 1, пос. Майский, Белгородская обл., 308503, Россия

⁴Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4, Москва, 119991, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Tatyana Vladimirovna Sevastyanova¹

Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor,
Leading Researcher
tatianakenegen@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8264-1156>

Boris Veniaminovich Usha²

Doctor of Veterinary Sciences,
Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
UshaBV@mgupp.ru

Sergey Borisovich Noskov³

Doctor of Veterinary Sciences, Professor
Noskovvetlab@yandex.ru

Alina Anatolyevna Alshevskaya⁴

Candidate of Medical Sciences,
Senior Researcher
alshevskaya_a_a@staff.sechenov.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7307-4524>

¹All-Russian Research and Technological Institute of Biological Industry, 17 Biokombinata Village, Losino-Petrovsky Urban District, Moscow Region, 141142, Russia

²Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH),

11 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125080, Russia

³Belgorod State Agricultural University named after V.Ya. Gorin, 1 Vavilov Str., Maisky village, Belgorod region, 308503, Russia

⁴I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Sechenovskiy University), 2/4 Bolshaya Pirogovskaya Str., Moscow, 119991, Russia

УДК 636.5.033/619

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-33-39

Г.М. Топурия

Оренбургский государственный
медицинский университет
Минздрава России, Оренбург,
Россия

✉ golaso@rambler.ru

Поступила в редакцию: 20.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Топурия Г.М.

Влияние препарата «Асид Лак» на состояние естественной резистентности организма цыплят-бройлеров

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В современных условиях интенсивного птицеводства в лечебно-профилактических целях зачастую бессистемно используются антибиотики, что способствует широкому развитию антибиотикоустойчивых штаммов микроорганизмов. Указанное обстоятельство требует изучения и внедрения в сельскохозяйственное производство кормовых добавок, оказывающих благоприятное влияние на организм и продуктивность птицы. Большую перспективу имеют препараты, созданные на основе органических кислот, обладающие антибактериальным и ростостимулирующим действием.

Методы. Были сформированы четыре группы суточных цыплят-бройлеров кросса Арбор Айкрес. Птица II, III и IV опытных групп в дополнение к основному рациону получала «Асид Лак» из расчета 2,0, 3,0 и 4,0 г/кг корма. Цыплята I группы служили контролем. В суточном, 7-, 14-, 28-, 35- и 42-дневном возрасте у птицы всех групп отбирали кровь для иммунологических исследований. По окончании выращивания провели убой бройлеров с последующим отбором тимуса, селезенки, бursy Фабрициуса для определения массы органов.

Результаты. Использование препарата «Асид Лак» в рационах цыплят-бройлеров способствовало усилению гуморальных факторов естественной резистентности организма. К концу выращивания лизоцимная активность сыворотки крови у птицы опытных групп превосходила контрольные значения на 6,63–7,77%, бактерицидная — на 5,37–6,04%. Фагоцитарная активность лейкоцитов крови увеличилась на 6,87–13,46%, фагоцитарный индекс — на 21,0–28,0%. Наблюдалось снижение количества циркулирующих иммунных комплексов на 5,88–9,83%. Масса тимуса, бursy Фабрициуса, селезенки была выше у цыплят-бройлеров опытных групп.

Ключевые слова: подкислители, цыплята-бройлеры, кровь, иммунитет, тимус, бурса, селезенка, фагоцитоз

Для цитирования: Топурия Г.М. Влияние препарата «Асид Лак» на состояние естественной резистентности организма цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 33–39. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-33-39>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-33-39

Gocha M. Topuria

Orenburg State Medical University
of the Ministry of Health of Russia,
Orenburg, Russia

✉ golaso@rambler.ru

Received by the editorial office: 20.07.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Topuria G.M.

The influence of the drug Acid Lac on the state of natural resistance of the body of broiler chickens

ABSTRACT

Relevance. In modern conditions of intensive poultry farming, antibiotics are often used unsystematically for therapeutic and prophylactic purposes, which contributes to the widespread development of antibiotic-resistant strains of microorganisms. This circumstance requires the study and introduction into agricultural production of feed additives that have a beneficial effect on the body and productivity of poultry. Preparations based on organic acids, which have antibacterial and growth-stimulating effects, have great potential.

Methods. Four groups of day-old broiler chickens of the Arbor Acres cross were formed. Birds of the II, III and IV experimental groups in addition to the main diet received Acid Lac at the rate of 2.0, 3.0 and 4.0 g/kg of feed. Chickens of the I group served as a control. Blood was collected from birds of all groups at the age of one day, 7, 14, 28, 35 and 42 days for immunological studies. At the end of growing, the broilers were slaughtered with subsequent collection of the thymus, spleen and bursa of Fabricius to determine the weight of the organs.

Results. The use of Acid Lac in broiler chicken diets contributed to the enhancement of humoral factors of natural resistance of the organism. By the end of rearing, the lysozyme activity of blood serum in the birds of the experimental groups exceeded the control values by 6.63–7.77%, bactericidal — by 5.37–6.04%. The phagocytic activity of blood leukocytes increased by 6.87–13.46%, the phagocytic index — by 21.0–28.0%. A decrease in the number of circulating immune complexes by 5.88–9.83% was observed. The weight of the thymus, bursa of Fabricius, spleen was higher in broiler chickens of the experimental groups.

Key words: acidifiers, broiler chickens, blood, immunity, thymus, bursa, spleen, phagocytosis

For citation: Topuria G.M. The influence of the drug Acid Lac on the state of natural resistance of the body of broiler chickens. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 33–39 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-33-39>

Введение/Introduction

Птицепродуктовый подкомплекс АПК в современных рыночных условиях занимает большой сегмент рынка, представляет собой сложную и взаимозависимую систему процессов производства, переработки, хранения и реализации продукции [1–3].

За последние годы птицеводство страны вышло на новый технологический уровень, обеспечивая продовольственную безопасность государства, а население полноценной животноводческой продукцией, с учетом показателей качества и безопасности продукции [4–8].

Дальнейшая интенсификация производства яиц и мяса птицы находится в прямой зависимости от полноценности кормления, качества кормов, условий содержания, наличия стресс-факторов, ветеринарного обслуживания [9–13].

Современными способами коррекции негативных факторов являются разработка и использование кормовых добавок, позволяющих улучшить метаболический и иммунный статус организма сельскохозяйственной птицы, устранить дефицит в рационе основных питательных веществ [14–19]. Особую перспективу имеют препараты природного происхождения, улучшающие процессы пищеварения и усвояемость питательных веществ корма, повышающие естественную резистентность, сохранность и продуктивность птицы [20–24].

Бесконтрольное использование антибактериальных фармакологических препаратов способствует в короткие сроки формированию антибиотикоустойчивых штаммов микроорганизмов, в результате чего резко снижается терапевтическая эффективность лекарственных средств [25, 26]. Кроме того, антибиотики оказывают негативное воздействие не только на патогены, но и на нормальную микрофлору желудочно-кишечного тракта. Во многих странах мира введен строгий запрет на применение антимикробных препаратов и других химиотерапевтических средств для активизации роста, развития, увеличения продуктивности животных [27, 28].

Антибиотики кумулируются в сырье и продуктах животноводства (мясе, молоке, яйцах птицы), что способствует развитию у потребителей аллергических реакций и других патологических состояний [29]. Препараты данной группы при их бесконтрольном применении являются загрязнителями окружающей среды.

Одна из основных причин падежа птицы — заболевания, вызванные условно-патогенной микрофлорой, устойчивой к антимикробным препаратам [30]. В качестве замены антибиотиков в птицеводстве успешно используются органические кислоты [31, 32].

Применение препаратов на основе органических кислот положительно влияет на пищеварение за счет роста и развития ворсинок тонкого кишечника, улучшения секреции ферментов [33, 34]. Кроме того, органические кислоты обладают бактерицидным и фунгицидным действием, что делает их перспективной альтернативой антимикробным средствам [35].

Цель исследования — изучить влияние препарата «Асид Лак» на состояние естественной резистентности организма и массу иммунных органов цыплят-бройлеров.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для проведения опытов в условиях вивария были сформированы четыре группы суточных цыплят-бройлеров кросса Арбор Айкрес ($n = 20$).

Птица I группы выращивалась на стандартном рационе для цыплят-бройлеров и служила контролем. Представителям II, III и IV групп на фоне основного корма дополнительно скармливали «Асид Лак» в дозе 2,0, 3,0 и 4,0 г/кг корма соответственно (табл. 1). Условия содержания и кормления подопытной птицы соответствовали рекомендациям по выращиванию цыплят данного кросса¹.

«Асид Лак» (Kemin Europa N.V., Бельгия) — препарат для подкисления корма, содержит молочную, фумаровую, лимонную, муравьиную кислоты. Подавляет развитие патогенной и условно-патогенной микрофлоры, нормализует микробиом желудочно-кишечного тракта.

В суточном, 7-, 14-, 28-, 35- и 42-дневном возрасте у подопытной птицы отбирали пробы крови для определения бактерицидной, лизоцимной, бета-литической активности сыворотки крови, фагоцитарных свойств лейкоцитов².

В 42-дневном возрасте провели убой подопытной птицы. Отбирали тимус, селезенку, бурсу Фабрициуса, проводили взвешивание данных органов на электронных весах ВЛ-224 («Госметр», Россия) с точностью до 0,001 г.

Схема эксперимента представлена в таблице 2.

Таблица 1. Экспериментальные группы цыплят-бройлеров

Table 1. Experimental groups of chickens

Группа птицы	Дозировка «Асид Лак», г/кг
I	–
II	2,0
III	3,0
IV	4,0

Таблица 2. Схема эксперимента

Table 2. Experimental scheme

Этап	Возраст птицы, сут.					
	1	7	14	28	35	42
Отбор крови	+	+	+	+	+	+
Отбор органов	–	–	–	–	–	+

¹ Кузнецов А.Ф., Тюрин В.Г., Семенов В.Г. Промышленное птицеводство: содержание, разведение и кормление сельскохозяйственной птицы. СПб.: Квадро. 2017; 392.

² Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Методы иммунологических исследований. Оренбург. 2024; 60.
<https://www.elibrary.ru/boulqp>

Эксперимент проводили с соблюдением требований, изложенных в Директиве Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22 сентября 2010 года № 2010/63/ЕС о защите животных, использующихся для научных целей³, и принципов обращения с животными согласно статье 4 ФЗ РФ № 498-ФЗ⁴.

Материал обработан статистически с использованием программы SPSS 22⁵.

Результаты и обсуждение /

Results and discussion

В суточном возрасте лизоцимная активность сыворотки крови цыплят контрольной и опытных групп составила 50,22–51,02%. К 7-дневному возрасту показатель был минимальным у птицы IV группы — $41,83 \pm 0,75\%$, что на 0,72% меньше, чем в контроле.

У представителей III группы лизоцимная активность была меньше на 0,38%, а у цыплят II группы на 2,26% превышала контроль. На 14-й день наблюдений изучаемый показатель у бройлеров контрольной группы составил $40,18 \pm 1,32\%$, что на 4,93% меньше, чем у птицы II группы, на 6,28% ($p < 0,05$), чем у бройлеров III группы, на 6,15% ($p < 0,05$) меньше, чем у птицы IV группы. В 28-дневном возрасте эта разница в пользу цыплят-бройлеров опытных групп увеличилась и составила 7,94% ($p < 0,01$), 8,36% ($p < 0,01$), 8,46% ($p < 0,01$) соответственно. К 35-дневному возрасту птица, которой скармливали «Асид Лак», превосходила контрольных сверстников по лизоцимной активности сыворотки крови, соответственно, на 7,75% ($p < 0,05$), 6,93% ($p < 0,05$) и 7,88% ($p < 0,01$).

К концу выращивания бройлеры контрольной группы уступали цыплятам II группы на 6,63% ($p < 0,05$), III группы — на 7,77% ($p < 0,01$), IV группы — на 7,28% ($p < 0,01$) (рис. 1).

Бактерицидная активность у цыплят суточного возраста составила 51,17–52,04%. В 7-дневном возрасте различия были незначительными — 0,05–0,34%. В 14-дневном возрасте бройлеры контрольной группы уступали сверстникам из опытных групп по данному показателю на 1,56–2,04%. К 28-дневному возрасту птица II группы превосходила контроль по бактерицидной активности сыворотки крови на 5,11% ($p < 0,05$), III группы — на 4,80%, IV группы — на 4,39%. В возрасте 35 дней эта разница составила 4,07–4,46%. К концу опыта бактерицидная активность сыворотки крови была выше в опытных группах на 5,37% ($p < 0,05$), 6,04% ($p < 0,05$) и 5,86% ($p < 0,05$) (рис. 2).

В суточном возрасте у подопытной птицы бета-литическая активность сыворотки крови составила 50,98–51,72%. В 7-дневном возрасте разница по изучаемому показателю была

Рис. 1. Лизоцимная активность сыворотки крови цыплят-бройлеров, %

Fig. 1. Lysozyme activity of broiler chicken blood serum, %

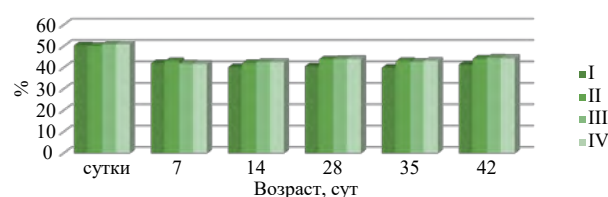


Рис. 2. Бактерицидная активность сыворотки крови цыплят-бройлеров, %

Fig. 2. Bactericidal activity of broiler chicken blood serum, %

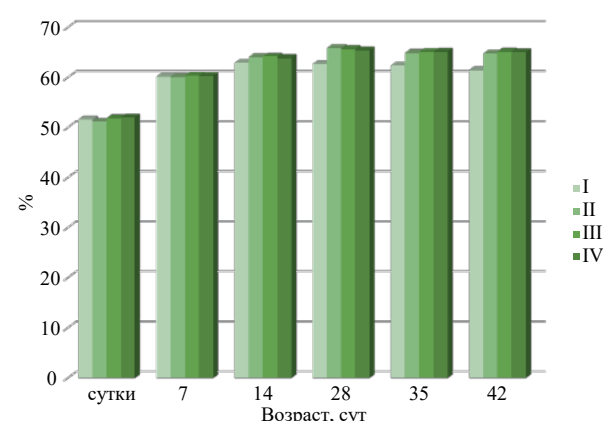
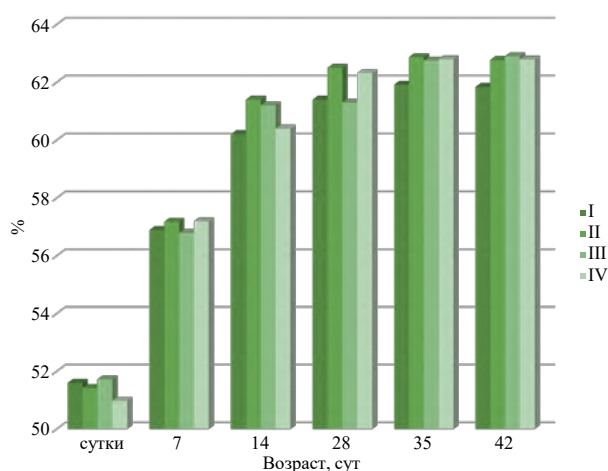


Рис. 3. Бета-литическая активность сыворотки крови цыплят-бройлеров, %

Fig. 3. Beta-lytic activity of broiler chicken blood serum, %



незначительной — 0,16–0,55%, в 14-дневном — 0,32–1,98%, в 28-дневном — 0,16–1,80%, в 35-дневном — 0,27–1,54%. К концу наблюдений (42-й день) бета-литическая активность сыворотки крови птицы опытных групп была выше, чем в контроле, на 1,51%, 1,72% и 1,54% соответственно (рис. 3).

Клеточные факторы естественной резистентности организма птицы оценивали по показателям фагоцитарных свойств лейкоцитов крови. У суточных цыплят фагоцитарная активность составила 48,64–49,10%, фагоцитарный индекс — 1,16–1,21.

³ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях.

https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063rus.pdf

⁴ 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».

⁵ <https://spss.sottonic.ru/>

Включение в рацион подопытной птицы кормовой добавки не оказало существенного влияния на фагоцитарную активность лейкоцитов в 7- и 14-дневном возрасте. Разница с контролем была незначительной — 0,10–0,23% и 1,11–1,50% соответственно. На 28-й день опыта изучаемый показатель был выше контрольного уровня на 4,16–5,37%. В 35-дневном возрасте разница в пользу птицы опытных групп составила 5,59% во II группе, 5,95% — в III, 5,88% — в IV. К концу выращивания фагоцитарная активность лейкоцитов крови максимальной была у представителей IV группы — $69,12 \pm 3,77\%$, что на 13,46% ($p < 0,01$) больше, чем у контрольной птицы. Цыплята-бройлеры II и III групп опережали контрольных сверстников на 6,87% ($p < 0,05$) и 11,67% ($p < 0,01$) соответственно (рис. 4).

При оценке фагоцитарного индекса лейкоцитов крови у цыплят-бройлеров установлено, что в 7-дневном возрасте разница была минимальной. В 14-дневном возрасте доза препарата 3,0 г/кг корма способствовала максимальному увеличению фагоцитарного индекса с разницей по отношению к контролю 5,0%. Птица опытных групп статистически достоверно превосходила контрольных цыплят по фагоцитарному индексу в 28- и 35-дневном возрасте: во II группе — на 8,0% ($p < 0,05$) и 16,20% ($p < 0,01$), в III — на 9,7% ($p < 0,05$) и 26,25% ($p < 0,01$), в IV — на 15,42% ($p < 0,01$) и 29,0% ($p < 0,01$). К концу наблюдений указанная тенденция сохранялась.

Бройлеры контрольной группы по фагоцитарному индексу лейкоцитов уступали на 21,0% ($p < 0,01$) птице II группы, на 28,0% ($p < 0,01$) — цыплятам III группы, на 23,40% ($p < 0,01$) — IV группы (рис. 5).

Количество циркулирующих иммунных комплексов в крови является интегральным фактором, отражающим уровень антигенной нагрузки на организм. Показатель у птицы контрольной и опытных групп с возрастом увеличивался, достигая максимального значения в 42 дня.

Сравнивая значения циркулирующих иммунных комплексов в крови птицы 7–14-дневного возраста, не установлено существенной разницы. В дальнейшие периоды исследования наблюдали снижение количества циркулирующих иммунных комплексов у цыплят, получавших «Асид Лак». Так, в 28-дневном возрасте птица контрольной группы превосходила по данному показателю цыплят-бройлеров II группы на 3,65%, III группы — на 5,75%, IV группы — на 9,37% ($p < 0,05$). В возрасте 35 дней преимущество оставалось за цыплятами контрольной группы при разнице с опытными группами 6,18% ($p < 0,05$), 10,5% ($p < 0,01$) и 10,73% ($p < 0,01$) соответственно. В 42-дневном возрасте минимальные значения количества циркулирующих иммунных комплексов установлены у бройлеров, получавших «Асид Лак» в количестве 3,0 г/кг и 4,0 г/кг корма при разнице с контролем 9,83% ($p < 0,05$) и 9,62% ($p < 0,05$). У представителей II опытной группы показатель был несколько

Рис. 4. Фагоцитарная активность лейкоцитов крови, %
Fig. 4. Phagocytic activity of blood leukocytes, %

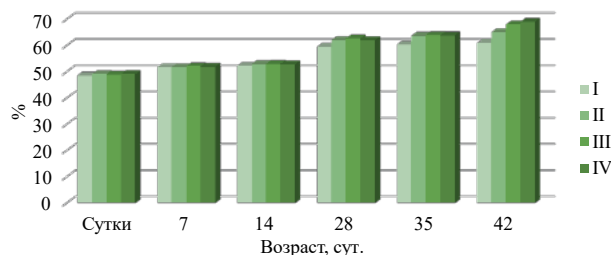


Рис. 5. Фагоцитарный индекс лейкоцитов крови
Fig. 5. Phagocytic index of blood leukocytes

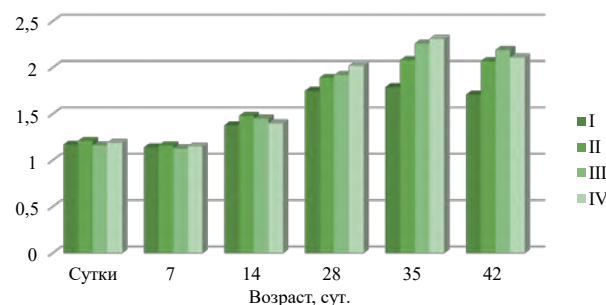


Рис. 6. Количество циркулирующих иммунных комплексов в крови цыплят-бройлеров, у. е.
Fig. 6. Number of circulating immune complexes in the blood of broiler chickens, c. u.

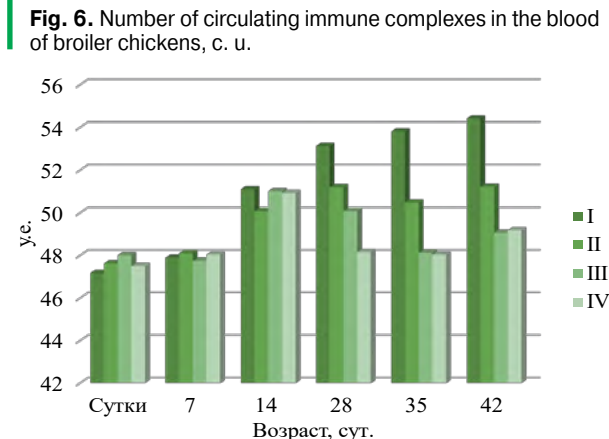
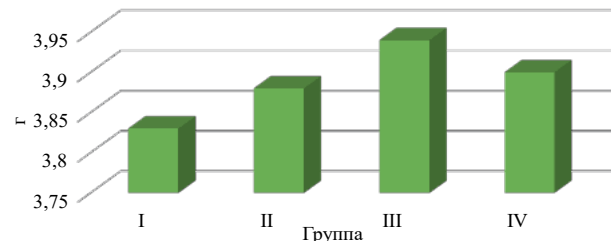
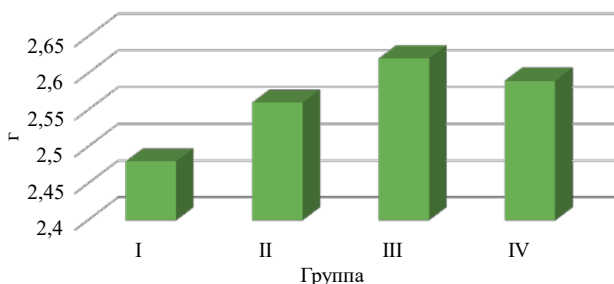


Рис. 7. Масса тимуса, г
Fig. 7. Thymus mass, g



выше, чем у цыплят III и IV групп, но меньше на 5,88%, чем у контрольных аналогов (рис. 6).

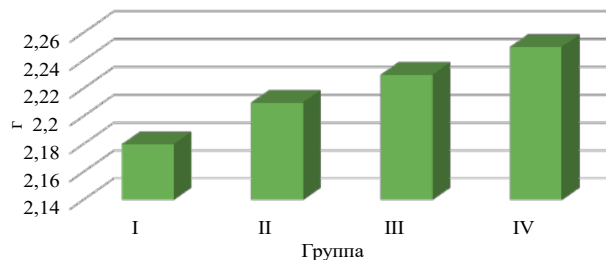
Усиление клеточных и гуморальных факторов естественной резистентности у цыплят-бройлеров при использовании препарата «Асид Лак» положительно сказалось на развитии иммунокомпетентных органов птицы. Так, у представителей II группы наблюдали повышение абсолютной массы тимуса на 1,31%, III группы — на 2,87%, IV группы — на 1,83% относительно контроля (рис. 7).

Рис. 8. Масса бursы Фабрициуса, г**Fig. 8.** Mass of Fabricius's Bursa, g

Изменение массы бursы Фабрициуса было более существенным. Минимальный вес органа регистрировался у бройлеров контрольной группы — $2,48 \pm 0,12$ г, что на 3,22% меньше, чем у цыплят II опытной группы, на 5,60%, чем у птицы III группы, на 4,44% меньше, чем у представителей IV группы (рис. 8).

К концу выращивания абсолютная масса селезенки у птицы опытных групп превысила контрольный уровень на 1,38%, 2,29% и 3,20% соответственно (рис. 9).

Органические кислоты, входящие в состав препарата, снижают pH корма и создают неблагоприятную среду для патогенной и условно-патогенной микрофлоры. Вместе с тем они усиливают рост и развитие симбионтных микроорганизмов (лактобактерий, бифидобактерий), обладающих иммуностимулирующей активностью.

Рис. 9. Масса селезенки, г**Fig. 9.** Spleen weight, g

Выводы/Conclusions

Использование препарата «Асид Лак» в рационах цыплят-бройлеров способствует улучшению клеточных и гуморальных факторов естественной резистентности организма птицы за счет повышения лизоцимной и бактерицидной активности сыворотки крови, фагоцитарных свойств лейкоцитов на фоне достоверного снижения количества циркулирующих иммунных комплексов на 5,88%, 9,83% ($p < 0,01$) и 9,62% ($p < 0,01$) соответственно. Бета-литическая активность крови к концу наблюдений у цыплят опытных групп изменялась незначительно — в пределах 1,51–1,72% ($p < 0,01$).

К концу выращивания птицы наблюдали увеличение абсолютной массы иммунокомпетентных органов, особенно бursы Фабрициуса. Масса данного органа у цыплят опытных групп была выше, чем у контрольных сверстников, на 3,22–5,60%.

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. Пашовкина Е.В. Комплексная система управления качеством продукции птицеводства. *Формула менеджмента*. 2023; (1): 30–34. <https://www.elibrary.ru/bsvyrc>
2. Зайцева Т.Н., Ребезов М.Б., Рябова В.Ф. Перспективы развития регионального рынка продуктами птицеводства. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 82-й Международной научно-технической конференции*. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. 2024; 2: 362. <https://www.elibrary.ru/xfnmat>
3. Смольникова Ф.Х., Амирханов К.Ж., Асенова Б.К., Ребезов М.Б., Оксханова Э.К. Основные направления в комплексной переработке мяса птицы. *Инновационные тренды, научные достижения и факторы устойчивого развития пищевых систем. 24-я Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти В.М. Горбатова (Горбатовские чтения — 2024)*. М.: Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова. 2024; 164–168. <https://www.elibrary.ru/pppiss>
4. Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Повышение эффективности производства мяса птицы. *Инновационные достижения в ветеринарии, зоотехнии, биотехнологии и экологии. Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием*. Оренбург: Агентство Пресса. 2024; 266–269. <https://www.elibrary.ru/woxyll>
5. Дмитриева О.С., Николаева С.Ю. Современное состояние птицеводства в агропромышленном комплексе России (обзорная статья). *Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям в АПК. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Дню академии*. Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. 2023; 106–111. <https://www.elibrary.ru/xjyftg>
6. Тимченко Л.Д. и др. Эффективная технология дезинфицирующего озонирования инкубационных куриных яиц. *Аграрная наука*. 2024; (10): 51–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-51-61>

REFERENCES

1. Pashkovkina E.V. Integrated quality management system for poultry products. *Formula menedzhmenta*. 2023; (1): 30–34 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/bsvyrc>
2. Zaytseva T.N., Rebezov M.B., Ryabova V.F. Prospects for the development of the regional market for poultry products. *Actual problems of modern science, technology and education. Abstracts of the 82nd International scientific and technical conference*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2024; 2: 362 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/xfnmat>
3. Smolnikova F.Kh., Amirkhanov K.Zh., Asenova B.K., Rebezov M.B., Okuskhanova E.K. Main directions in the integrated processing of poultry meat. *Innovative trends, scientific achievements and factors in the development of food systems. 24th International scientific and practical conference dedicated to the memory of V.M. Gorbato (Gorbato readings — 2024)*. Moscow: V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences. 2024; 164–168 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pppiss>
4. Topuriya L.Yu., Topuriya G.M. Improving the efficiency of poultry meat production. *Innovative achievements in veterinary medicine, animal science, biotechnology and ecology. Proceedings of the National scientific and practical conference with international participation*. Orenburg: Agentstvo Pressa. 2024; 266–269 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/woxyll>
5. Dmitrieva O.S., Nikolaeva S.Yu. The current state of poultry farming in the agro-industrial complex of Russia (review article). *Scientific research of higher education in priority areas in the agro-industrial complex. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the Academy Day*. Velikiye Luki: Velikiye Luki State Agricultural Academy. 2023; 106–111 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/xjyftg>
6. Timchenko L.D. et al. Effective technology of disinfecting ozonation of hatching chicken eggs. *Agrarian science*. 2024; (10): 51–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-51-61>

7. Rebezov M. *et al.* Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024; 18: 523–546. <https://doi.org/10.5219/1972>
8. Жуманова Г.Т., Асенова Б.К., Ребезов М.Б. Исследование химического состава и показатели безопасности исследуемых куриных гребней как сырья для получения белкового обогапителя. *Интеграция образования, науки и производства. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Мелеуз: Башкирский институт технологий и управления*. 2020; 44–49. <https://www.elibrary.ru/lqqtfd>
9. Семенов В.Г., Кочиш О.И., Боронин В.В., Малихин Д.А., Боронина А.Ю. Активизация неспецифической резистентности организма иммуностимулирующими препаратами в реализации продуктивного потенциала птицы. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2025; 261: 205–209. <https://elibrary.ru/diwwmz>
10. Шацких Е., Королькова-Субботкина Д. Сохраняем здоровье кишечника мясной птицы. *Животноводство России*. 2023; (7): 13–16. <https://doi.org/10.25701/ZZR.2023.06.06.007>
11. Менякина А.Г., Гамко Л.Н., Строченова А.И. Эффективность скармливания цыплятам-бройлерам комбикормов с разной рецептурой. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022; (3): 24–31. <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-91-3-24-31>
12. Gorelik O.V. *et al.* Influence of transport stress on the adaptation potential of chicken. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020; 10(2): 260–263. <https://www.elibrary.ru/leezaj>
13. Колесник Е.А., Дерхо М.А., Ребезов М.Б., Мамылина Н.В. Индекс атерогенности, соотношения липопротеинов, общего холестерина и белка бройлерных кур как фактор здоровьесберегающих технологий. *Аграрный вестник Урала*. 2024; 24(11): 1459–1475. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1459-1475>
14. Коткова Т.В., Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Показатели крови птицы на фоне применения растительной кормовой добавки. *Современные научно-практические достижения в ветеринарии. Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции. Киров: Вятский государственный агротехнологический университет*. 2024; 15: 140–143. <https://www.elibrary.ru/wonpuq>
15. Сингариева Н.Ш., Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Биохимические показатели крови кур-несушек под влиянием фитобиостимулятора. *Инновационные достижения в ветеринарии, зоотехнии, биотехнологии и экологии. Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием. Оренбург: Агентство Пресса*. 2024; 258–260. <https://www.elibrary.ru/lbtupu>
16. Сингариева Н.Ш., Топурия Л.Ю. Показатели иммунного статуса птицы при применении кормовой добавки. *Национальные приоритеты развития агропромышленного комплекса. Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием. Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет*. 2024; 335–339. <https://www.elibrary.ru/fkrscm>
17. Grant A., Gay C.G., Lillehoj H.S. *Bacillus* spp. as direct-fed microbial antibiotic alternatives to enhance growth, immunity, and gut health in poultry. *Avian Pathology*. 2018; 47(4): 339–351. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1464117>
18. Sharipova A. *et al.* The Effects of a Probiotic Dietary Supplementation on the Livability and Weight Gain of Broilers. *Annual Research & Review in Biology*. 2017; 19(6): 37344. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/37344>
19. Горелик О.В., Ребезов М.Б., Долматова И.А. Научные подходы к кормлению сельскохозяйственной птицы. *За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества. Сборник научных статей 2-й Всероссийской молодежной научной конференции. Курск: Юго-Западный государственный университет*. 2021; 4: 63–66. <https://www.elibrary.ru/wuknhp>
20. Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Химический состав, энергетическая и биологическая ценность мяса цыплят-бройлеров при применении пробиотика. *Ветеринария Кубани*. 2025; (1): 19–22. <https://www.elibrary.ru/ajmzbz>
21. Ребезов М.Б., Топурия Л.Ю., Фатеева О.О. Влияние пробиотиков на минеральный состав крови уток. *Перспективы развития отрасли и предприятий АПК: отечественный и международный опыт. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина*. 2020; 225–227. <https://www.elibrary.ru/nwxtrf>
7. Rebezov M. *et al.* Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024; 18: 523–546. <https://doi.org/10.5219/1972>
8. Zhumanova G.T., Asenova B.K., Rebezov M.B. Research of the chemical composition and safety indicators of the chicken combs, researched as a raw material for producing a protein processor. *Integration of education, science and production. Collection of materials of the International scientific and practical conference. Meleuz: Bashkir Institute of Technology and Management*. 2020; 44–49 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/lqqtfd>
9. Semenov V.G., Kochish O.I., Boronin V.V., Malykhin D.A., Boronina A.Yu. Activation of non-specific resistance of the organism with immunostulating preparations in the release of the productive potential of poultry. *Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2025; 261: 205–209 (in Russian). <https://elibrary.ru/diwwmz>
10. Shatskykh E., Korolkova-Subbotkina D. Keeping intestine health of meat poultry. *Animal Husbandry of Russia*. 2023; (7): 13–16 (in Russian). <https://doi.org/10.25701/ZZR.2023.06.06.007>
11. Menyakina A.G., Gamko L.N., Strochenova A.I. Efficiency of feeding broiler chickens with mixed feeds of different recipes. *Vestnik Bryansk State Agricultural Academy*. 2022; (3): 24–31 (in Russian). <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-91-3-24-31>
12. Gorelik O.V. *et al.* Influence of transport stress on the adaptation potential of chicken. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020; 10(2): 260–263. <https://www.elibrary.ru/leezaj>
13. Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B., Mamylyna N.V. Atherogenicity index, ratio of lipoproteins, total cholesterol and protein of broiler chickens as a factor of health-saving technologies. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24(11): 1459–1475 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1459-1475>
14. Kotkova T.V., Topuria L.Yu., Topuria G.M. Blood indicators of poultry against the application of plant feed additive. *Modern scientific and practical achievements in veterinary medicine. Collection of articles of the XXIII International scientific and practical conference. Kirov: Vyatka State Agrotechnological University*. 2024; 15: 140–143 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wonpuq>
15. Singarieva N.Sh., Topuriya L.Yu., Topuriya G.M. Biochemical indices of laying hens' blood under the influence of phytobiostimulator. *Innovative achievements in veterinary medicine, animal science, biotechnology and ecology. Proceedings of the national scientific and practical conference with international participation. Orenburg: Agentstvo Pressa*. 2024; 258–260 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/lbtupu>
16. Singarieva N.Sh., Topuriya L.Yu. Indicators of the immune status of poultry when using a feed additive. *National priorities for the development of the agro-industrial complex. Proceedings of the National scientific and practical conference with international participation. Orenburg: Orenburg State Agrarian University*. 2024; 335–339 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/fkrscm>
17. Grant A., Gay C.G., Lillehoj H.S. *Bacillus* spp. as direct-fed microbial antibiotic alternatives to enhance growth, immunity, and gut health in poultry. *Avian Pathology*. 2018; 47(4): 339–351. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1464117>
18. Sharipova A. *et al.* The Effects of a Probiotic Dietary Supplementation on the Livability and Weight Gain of Broilers. *Annual Research & Review in Biology*. 2017; 19(6): 37344. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/37344>
19. Gorelik O.V., Rebezov M.B., Dolmatova I.A. Scientific approaches to feeding agricultural poultry. *The future is ours: a view of young scientists on the innovative development of society. Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian youth scientific conference. Kursk: Southwest State University*. 2021; 4: 63–66 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wuknhp>
20. Topuria L.Yu., Topuria G.M. Chemical composition, energy and biological value of broiler chicken meat when using a probiotic. *Veterinaria Kubani*. 2025; (1): 19–22 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ajmzbz>
21. Rebezov M.B., Topuria L.Yu., Fateeva O.O. Effect of probiotics on mineral composition of duck blood. *Prospects for the development of the industry and enterprises of the agro-industrial complex: domestic and international experience. Collection of materials of the International scientific and practical conference. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin*. 2020; 225–227 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/nwxtrf>

22. Топурия Г.М., Топурия Л.Ю., Григорьева Е.В., Ребезов М.Б. Влияние пробиотиков на продуктивность цыплят-бройлеров. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2014; (2): 143–145. <https://www.elibrary.ru/sfsctr>
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; (11): 55–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-55-61>
24. Boysinova N., Ibragimov F., Yunusov K., Achilov O., Rasulov U. The effectiveness of using probiotics, their effect on growth and chemical composition of broiler chicken meat. *BIO Web of Conferences*. 2024; 95: 01013. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249501013>
25. Kastarnova E., Orobets V., Shakhova V., Kireev I., Sevostyanova O., Grudeva E. Clinical and Therapeutic Effectiveness of Nanoscale Antibacterial Drugs for Veterinary Use. Muratov A., Ignatieva S. (eds.). *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2021)*. Agricultural Innovation Systems. Cham: Springer. 2022; 2: 212–221. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91405-9_23
26. Shabunin S., Shakhov A., Sashnina L., Vladimirova Yu., Kopytina K. Therapeutic efficacy of a complex drug based on interferons for *Actinobacillus pleuropneumonia* in piglets. *BIO Web of Conferences*. 2021; 36: 06010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213606010>
27. Ляшчук Ю.О., Овчинников А.Ю., Беляков М.В., Самарин Г.Н., Калашников М.В. Обзор средств антибиотикотерапии, активных в отношении возбудителей инфекционного мастита. *Аграрная наука*. 2024; (6): 50–55. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-50-55>
28. Шастин П.Н. и др. Антибиотикорезистентность и фагочувствительность листериозных патогенов. *Аграрная наука*. 2024; (3): 50–56. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-50-56>
29. Тюрин Д.Г. и др. Развитие антибиотикорезистентности микроорганизмов у цыплят-бройлеров под влиянием ветеринарных антибиотиков и пробиотика. *Аграрная наука*. 2024; (3): 85–91. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-85-91>
30. Гугушвили Н.Н., Инюкина Т.А., Кошчаев А.Г., Семененко М.П., Топурия Л.Ю. Влияние фитоиммунomodлятора содэхина-40 и антисептика катис на общеклинические показатели крови птиц. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024; 112: 225–231. <https://www.elibrary.ru/wvksjz>
31. Васильева К.В., Коломиец С.Н. Влияние нового препарата на основе органических кислот на пищеварение и некоторые показатели обмена веществ цыплят-бройлеров. *Ветеринарный врач*. 2021; (1): 21–25. <https://doi.org/10.33632/1998-698X.2021-1-21-25>
32. Матросова Ю.В., Овчинников А.А., Нугуманова К.А., Вахапова А.Ю. Влияние бутиратов на мясную продуктивность цыплят-бройлеров. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2023; (4): 314–318. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-314-318>
33. Папуниди Э.К., Габдрахманова А.Р., Смоленцев С.Ю. Влияние препаратов на основе органических кислот и растительного сырья на прирост живой массы и качество мяса цыплят. *Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки*. 2019; 5(1): 28–35. <https://www.elibrary.ru/kkoukp>
34. Сычева Л.В., Юнусова О.Ю. Применение подкислителей в кормлении цыплят-бройлеров. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2019; 239: 205–208. <https://elibrary.ru/ikijrv>
35. Апалеева М.Г., Краснощекова Т.А., Андреева Г.А. Сравнительная эффективность кормовых препаратов на основе органических кислот при выращивании цыплят-бройлеров в условиях ООО «Амурский бройлер». *Животноводство и кормопроизводство*. 2020; 103(1): 180–189. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-1-180>
22. Topuria G.M., Topuria L.Yu., Grigoryeva E.V., Rebezov M.B. Effect of probiotics on broiler-chickens productivity. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2014; (2): 143–145 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/sfsctr>
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; (11): 55–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-55-61>
24. Boysinova N., Ibragimov F., Yunusov K., Achilov O., Rasulov U. The effectiveness of using probiotics, their effect on growth and chemical composition of broiler chicken meat. *BIO Web of Conferences*. 2024; 95: 01013. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249501013>
25. Kastarnova E., Orobets V., Shakhova V., Kireev I., Sevostyanova O., Grudeva E. Clinical and Therapeutic Effectiveness of Nanoscale Antibacterial Drugs for Veterinary Use. Muratov A., Ignatieva S. (eds.). *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2021)*. Agricultural Innovation Systems. Cham: Springer. 2022; 2: 212–221. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91405-9_23
26. Shabunin S., Shakhov A., Sashnina L., Vladimirova Yu., Kopytina K. Therapeutic efficacy of a complex drug based on interferons for *Actinobacillus pleuropneumonia* in piglets. *BIO Web of Conferences*. 2021; 36: 06010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213606010>
27. Lyashchuk Yu.O., Ovchinnikov A.Yu., Belyakov M.V., Samarina G.N., Kalashnikov M.V. Review of antibiotic agents active against infectious mastitis pathogens. *Agrarian science*. 2024; (6): 50–55 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-50-55>
28. Shastin P.N. et al. Antibiotic resistance and phage sensitivity of topical listeriosis pathogens. *Agrarian science*. 2024; (3): 50–56 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-50-56>
29. Tyurina D.G. et al. The development of antimicrobial resistance in broilers affected by veterinary antimicrobials and a probiotic administration. *Agrarian science*. 2024; (3): 85–91 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-85-91>
30. Gugushvili N.N., Inyukina T.A., Koshchayev A.G., Semenenko M.P., Topuria L.Yu. The effect of the phytoimmunomodulator Sodechin-40 and antiseptic Katis on the general clinical blood parameters of birds. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024; 112: 225–231 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wvksjz>
31. Vasilyeva K.V., Kolomiets S.N. Effect of a new preparation based on organic acids on digestion and some indicators of metabolism in broiler chickens. *The veterinary vrach*. 2021; (1): 21–25 (in Russian). <https://doi.org/10.33632/1998-698X.2021-1-21-25>
32. Matrosova Yu.V., Ovchinnikov A.A., Nugumanova K.A., Vakhapova A.Yu. Influence of butyrates on the meat productivity of broiler chickens. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023; (4): 314–318 (in Russian). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-102-4-314-318>
33. Papunidi E.K., Gabdrakhmanova A.R., Smolentsev S.Yu. Effect of drugs on the basis of organic acids and plant raw materials on the live weight gain and meat quality of chickens. *Bulletin of the Mari State University. Series: Agricultural Sciences. Economic sciences*. 2019; 5(1): 28–35 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/kkoukp>
34. Sycheva L.V., Yunusova O.Yu. Application of acidifiers in feeding broiler chickens. *Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2019; 239: 205–208 (in Russian). <https://elibrary.ru/ikijrv>
35. Apaleeva M.G., Krasnoshchekova T.A., Andreeva G.A. The comparative effectiveness of feed preparations based on organic acids in the cultivation of broiler chickens in the conditions of LLC Amursky broiler. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020; 103(1): 180–189 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-1-180>

ОБ АВТОРАХ

Гоча Мирианович Топурия

доктор биологических наук, профессор кафедры нормальной физиологии
golaso@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9485-5282>

Оренбургский государственный медицинский университет
Минздрава России,
ул. Советская, 6, Оренбург, 460014, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Gocha Mirianovich Topuria

Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Normal Physiology
golaso@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9485-5282>

Orenburg State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation,
6 Sovetskaya Str., Orenburg, 460014, Russia

УДК 636.592.2 + 338.439.5

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-40-47

Я.М. Ребезов¹ ✉

О.В. Горелик²

М.Б. Ребезов^{2,3}

Р.Р. Хайбрахманов⁴

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

²Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

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

⁴Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

✉ yaraslavreb@yandex.ru

Поступила в редакцию: 02.10.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Ребезов Я.М., Горелик О.В.,
Ребезов М.Б., Хайбрахманов Р.Р.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-40-47

Yaroslav M. Rebezov¹ ✉

Olga V. Gorelik²

Maksim B. Rebezov^{2,3}

Ruslan R. Khaibrakhmanov⁴

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

²Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

³V.M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

✉ sholpan_bsb@mail.ru

Received by the editorial office: 02.10.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Rebezov Ya.M., Gorelik O.V.,
Rebezov M.B., Khaibrakhmanov R.R.

Положение российского индейководства в 2025 году

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Представлен анализ рынка производства мяса индеек в России. Птицеводство (и индейководство, в частности) в современной России — одна из растущих отраслей, которая может решить задачи по обеспечению населения полноценными продуктами с высокой пищевой ценностью и обеспечить продовольственную безопасность.

Методы. Анализ охватывает период с 2024 г. по август 2025-го. Поиск потенциально релевантных статей проводили по ключевым словам в электронных базах данных, официальным данным Росстата и в открытом доступе сети Интернет.

Результаты. Выявлен рост производства мяса индеек в России за последние 5 лет (эта тенденция остается неизменной). Отечественное производство мяса индейки в 2024 г. выросло на 3,8% по сравнению с предыдущим годом, достигнув 438 тыс. т. Доля индейки в общем объеме производства мяса птицы в России в конце 2024 году достигла 8%. Несмотря на темпы роста, индейка занимает лишь 3,4% от годового потребления мяса россиянами. Основные проблемы отрасли — слабость отечественной племенной базы, панзоотия гриппа птиц, необходимость повышения спроса на мясо индеек среди населения.

Ключевые слова: индейководство, рынок, объем производства, мясо индеек, импорт, экспорт, проблемы отрасли

Для цитирования: Ребезов Я.М., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Хайбрахманов Р.Р. Положение российского индейководства в 2025 году. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 40–47. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-40-47>

The state of Russian turkey farming in 2025

ABSTRACT

Relevance. This article presents an analysis of the turkey meat production market in Russia. Poultry farming (and turkey farming in particular) in modern Russia is a growing industry that can address the challenges of providing the population with nutritious, high-value products and ensuring food security.

Methods. The analysis covers the period from 2024 to August 2025. The search for potentially relevant articles was carried out by keywords in electronic databases, official data from Rosstat, and publicly available on the Internet.

Results. The growth of turkey meat production in Russia over the past 5 years has been revealed (this trend remains unchanged). Domestic turkey meat production in 2024 increased by 3.8% compared to the previous year, reaching 438,000 tons. Turkey's share of total poultry meat production in Russia reached 8% at the end of 2024. Despite this growth, turkey accounts for only 3.4% of Russian annual meat consumption. The industry's main problems are the weakness of the domestic breeding base, the avian influenza pandemic, and the need to increase demand for turkey meat among the population.

Key words: turkey farming, market, production volume, turkey meat, import, export, industry problems

For citation: Rebezov Ya.M., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Khaibrakhmanov R.R. The state of Russian turkey farming in 2025. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 40–47 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-40-47>

Введение/Introduction

По мере увеличения человеческой популяции основными задачами современного общества становятся поиск и обеспечение населения наиболее качественными и оптимальными продуктами питания. В связи с этим птицеводство занимает одну из ведущих ролей в данном процессе, поскольку является основным источником животного белка — важнейшего ингредиента в рационе человека [1–3].

Сегодня российская индустрия производства индейки располагает потенциалом для замещения импортных товаров, содействуя решению задач по оздоровлению питания населения, достижения высокой рентабельности производства и укрепления продовольственной безопасности государства [4–6].

Индейководство представляет собой одно из многообещающих направлений в птицеводстве, поскольку мясо индеек характеризуется диетическими свойствами, низким содержанием холестерина и подходит для организации детского питания [7–11].

По своей питательной ценности мясо индеек сопоставимо с говядиной, но отличается пониженным содержанием жиров и холестерина, что делает его ценным компонентом при создании продуктов питания с уменьшенной калорийностью. В 100 г мяса индейки содержится 22,98 г белка и 8,12 г жира [4, 12, 13]. Кроме того, мясо индеек разрешено в питании основных религий, распространенных в Российской Федерации, и может быть использовано вместо свинины при производстве продукции стандартов «халяль» и «кошер», что способствует развитию специализированных линеек продукции [14–17].

В России существует пул пород как выведенных в СССР (северокавказская белая и бронзовая, московская бронзовая, северокавказская бронзовая и черная тихорецкая), так и перспективных зарубежных (белая и бронзовая широкогрудая), что может быть актуальным для выведения новых, более продуктивных кроссов в будущем [18, 19].

Цели работы — изучение рынка производства мяса индеек в России, его положение на международной арене, а также условия для дальнейшего роста отрасли.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Поиск литературы проводили без ограничений по дате публикации, типу источника и языку исследования. Анализ охватывает период с 2024 по 2025 г. включительно.

Поиск потенциально релевантных материалов осуществляли по ключевым словам в электронных базах данных Scopus¹, Sci-Hub² и eLibrary.ru³, а также по официальным данным Росстата и источникам в открытом доступе сети Интернет.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В Российской Федерации последние годы характеризуется устойчивым ростом производство мяса птицы⁴ [20–22]. В 2024 году отмечен прирост на 2%, а общий объем производства всеми типами хозяйств составил 5277 тыс. т мяса в убойном весе [23]. Положительная динамика в секторе производства мяса птицы сохраняется и в первой половине 2025 года: произведенные объемы достигли 2,64 млн т, что на 2,9% больше, чем в аналогичный период 2024 г.⁵

Во всем объеме произведенного мяса птицы в России мясо индеек занимает 2-е место после бройлеров⁶. Россия, долгое время выступавшая импортером мяса индеек, в 2025 г. занимает 2-е место в мире после США по объемам производства и экспорта данной продукции⁷ [1, 24].

В целом на международной арене производства мяса индеек сложилась неоднозначная картина: наблюдается общее снижение мирового производства мяса индеек в ведущих странах⁸ (рис. 1).

В США — мировом лидере по производству — объемы сократились на 6,1% за год и на 3% за десятилетие, во Франции (по сравнению с 2015 г.) — на 38,1%. В Бразилии и Великобритании падение составило 61% и 53,6% соответственно. Основные причины — торговые ограничения, снижение спроса и усиление конкуренции со стороны более дешевых производителей (из Польши). В Германии, Канаде и Италии спад (от -7 до -22%) связан с ограниченным экспортом и вспышками птичьего гриппа. Среди мировых производителей, входящих в топ-10 по этому показателю, положительную динамику сохраняют только Польша, Испания и Россия^{3,9} [25].

¹ URL: <https://www.elsevier.com/products/scopus>

² URL: <https://sci-hub.ru/>

³ URL: <https://elibrary.ru/>

⁴ Индейководство продолжает уверенный рост. Комбикорма. 2025; (2): 40–41.

<https://elibrary.ru/uhoatv>

⁵ Мясная отрасль России: производство в I полугодии 2025 г.

— URL: https://id-marketing.ru/catalog/pischevaja_promyshlennost/proizvodstvo_mjasa_i_mjasnyh_izdelij/myasnaya-otrasl-rossii-proizvodstvo-v-1-polugodii-2025-1382/#tab-description

⁶ Росстат. — URL: <https://rosstat.gov.ru/>

⁷ Россия закрепила статус крупнейшего производителя индейки в Европе и второго — в мире. Мясная индустрия. 2024; (5): 52.

<https://elibrary.ru/dfnwzz>

⁸ Россия уверенно лидирует в мировом индейководстве по темпам роста.

— URL: <https://rusindeyka.ru/tpost/xhb3tcxr41-rossiya-uverenno-lidruet-v-mirovom-inde>

⁹ Производство индейки в России растет вопреки мировым тенденциям.

— URL: <https://rg.ru/2025/05/28/proizvodstvo-indejki-v-rossii-rastet-vopreki-mirovym-tendenciam.html>

В России за последние пять лет производство мяса индейки возросло более чем на 50%: в 2019 г. — 276 тыс. т, в 2020-м — 330 тыс. т, в 2022-м — 415 тыс. т, в 2023 г. — 422 тыс. т [8] (рис. 2).

В 2024 году производство увеличилось еще на 3,8%. Объем продукции составил 438 тыс. т мяса в убойном весе, несмотря на резкий рост издержек, связанных с удорожанием племенного материала, производственного оборудования и логистики [26].

Согласно подсчетам информационно-аналитического агентства «ИМИТ», экспорт мяса индеек из России в 2024 г. составил 27,7 тыс. т, что на 8% (2,0 тыс. т) больше по сравнению с предыдущим годом. География поставок охватывает 37 стран, ключевыми покупателями стали Китай (59,5%), Бенин (15,6%) и Республика Конго (10,6%). Примечательно, что российские производители практически полностью контролируют рынок Китая (16 тыс. т), увеличив свои продажи там более чем на 72% с 2023 г. [23, 26].

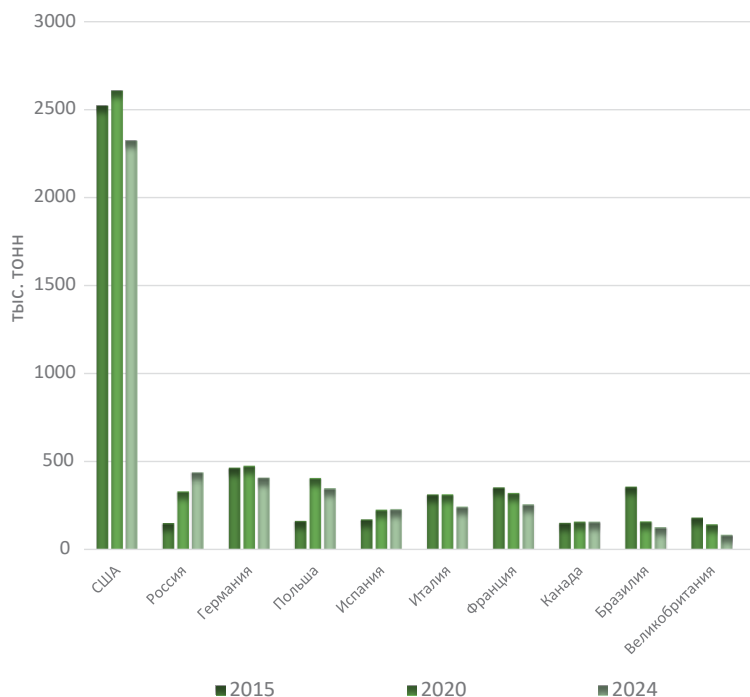
В текущем году тенденция роста экспорта и основные направления для внешних продаж остаются теми же: около 90% всего экспорта приходится на Китай, Бенин, Конго, Гвинею, ОАЭ, Саудовскую Аравию, Катар. За первую половину 2025 г. были поставлены 8,3 тыс. т продукции, что на 22% (или на 1,5 тыс. т) превышает показатель аналогичного периода прошлого года [25].

Более 85% всего объема российского рынка приходится на долю пяти крупнейших производителей (табл. 1). Лидирующую позицию сохраняет ГК «Дамате» (55%), которая существенно расширила свой ассортимент и сеть дистрибуции по всей территории страны¹⁰.

Доля личных подсобных и крестьянско-фермерских хозяйств продолжает снижаться: в 2024 г. на них приходилось чуть более 6% производства, что на 1% ниже доли в общем объеме мяса птицы. Причинами выступают дефицит инкубационного яйца и сложности реализации продукции в условиях рыночной концентрации⁴ [26].

В 2025 году крупные предприятия («Дамате», «Агро-плюс», «СоюзПром-Птица» и «Черкизово»)

Рис. 1. Динамика объема производства мяса индеек в ведущих странах
Fig. 1. Dynamics of turkey meat production in leading countries



активно инвестируют в расширение производства. Реализуются проекты по строительству новых перерабатывающих предприятий и племерепродукторов в Пензенской, Тюменской областях и Ставропольском крае⁴ [26].

Основными кроссами, используемыми крупными компаниями в 2025 г. в России, остаются кроссы белой широкогрудой индейки Хайбрид Конвертер и БИГ-6¹¹ [27].

Главным приоритетом для отечественных производителей должно оставаться обеспечение потребностей внутреннего рынка [20, 28, 29].

Доля мяса индеек в общем производстве мяса птицы в 2024 г. достигла 8%, в то время как на

Рис. 2. Объем производства мяса индеек в 2010–2025 гг.
Fig. 2. Turkey meat production volume in 2010–2025



¹⁰Итоги 2024 года: российское индейководство продолжает уверенный рост.

— URL: <https://rusindeyka.ru/tpost/3s7opz6no1-itogi-2024-goda-rossiiskoe-indeikovodstv>

¹¹URL: <https://aviagenturkeys.us/breeds/>

Таблица 1. Российские производители и объемы производства мяса индеек в 2024 г.

Table 1. Russian turkey meat producers and production volumes in 2024

Позиция	Компания	Объем производства в убойном весе в 2024 г., т
1.	ГК «Дамате»	241 522
2.	ГК «Черкизово»	65 882
3.	«СоюзПромПтица»	30 050
4.	ГК «Руском»	20 258
5.	«Агро-плюс»	10 878
6.	«Аскор»	5113
7.	«Егорьевская птицефабрика»	4817
8.	«Кривец-птица»	4410
9.	Птицекомплекс «Южный»	4275
10.	«Восточная-Агро»	4020
11.	«Ак Барс»	3985
12.	«Белгородская индейка»	3198
13.	«Конкорд»	2150
14.	«Таврическая»	1950
15.	Агрофирма «Норов»	1750
16.	«Старожиловская птица»	1839
17.	«Самарская индейка»	1170
18.	«Ястребовское»	1086
19.	«Бронницкая птицефабрика»	926
20.	«ПтиДом»	794
21.	ИП КФХ Ядыгин Д.С.	585
22.	Прочие (в т. ч. КФХ и ЛПХ)	27 350
	Итого	438 008

экспорт пришлось всего 6%. Импорт мяса индеек увеличился незначительно — до 4,3 тыс. т, что указывает на недостаточную насыщенность внутреннего рынка⁴ [26].

В течение 2024 г. ценовая ситуация оставалась относительно стабильной. В конце 2024 г. — начале 2025 г. отмечено постепенное увеличение стоимости основных наименований продукции — филе грудки и бедра (до 490 руб/кг для оптового сегмента)⁴ [26]. Это обусловлено ростом производственных затрат во всей мясоперерабатывающей отрасли. Совокупный рост цен делает мясо индейки привлекательной альтернативой более дорогим видам красного мяса, включая свинину¹² [26].

Увеличение темпов роста отрасли зависит от спроса. На 2024 год в продовольственной корзине россиян индейка занимает незначительное место — 3,4% от годового потребления мяса, тогда как в странах Европы со схожей продовольственной корзиной этот показатель на порядок выше: в Австрии — 21%, в Италии — 25%, в Германии — 26%¹³.

Еще одним из стимулов увеличения продаж мяса индеек является постоянно растущий в последнее десятилетие тренд на здоровое питание.

Мясо индеек расширяет ассортимент мясных деликатесных продуктов на внутреннем рынке⁶. Для формирования устойчивого спроса требуется повышение осведомленности населения о пищевой ценности и пользе мяса индейки, а также развитие государственной поддержки производителей через программы продвижения здорового питания.

Несмотря на позитивное состояние отрасли в целом, существуют определенные риски, которые могут оказать существенное воздействие на развитие индустрии в будущем. В «Стратегии развития агропромышленного комплекса до 2030 года» (от 8 сентября 2022 года) основной целью обозначено повышение уровня продовольственной безопасности страны, что подчеркивает актуальность задачи по наращиванию объемов сельскохозяйственного производства¹⁴.

Основными сдерживающими факторами для дальнейшего развития российского индейководства являются ограниченная племенная база и зависимость от импорта генетического материала. Так, по данным НАПИ⁵, уменьшение импорта инкубационных яиц стало одним из ключевых факторов, ограничивающих рост производства индейки в 2024–2025 гг. Это повлекло за собой удорожание конечной продукции, так как выросла стоимость племенного материала. Данная ситуация была обусловлена снижением доступности продукции на международном рынке из-за распространения высокопатогенного гриппа птиц в странах Европы и Северной Америки¹² [21, 30].

Нехватка инкубационных яиц сохраняется и в 2025 г., так как увеличение внутреннего производства возможно лишь в среднесрочной перспективе (3–5 лет) при условии наличия стабильных поставок родительских стад, инкубационных яиц и доступных кредитных инструментов для инвестиций в племенную работу^{12, 13} [26]. Кроме того, для российских племенных и товарных хозяйств сохраняются биологические риски, связанные с возможностью заноса инфекционных заболеваний из других стран.

Непрекращающаяся панзоотия гриппа птиц остается одним из наиболее значимых вызовов для российского индейководства. После временного снижения заболеваемости в первой половине 2024 г. вспышки, начавшиеся в августе, вновь охватили крупные регионы Северной Америки, Европы, а также отдельные страны Азии и Африки^{5, 15, 16} [26].

¹² Производство индейки к 2030 году может вырасти в 1,6 раза. Рынок мяса и мясных продуктов. 2021; (7): 23–25.

<https://elibrary.ru/qzrmux>

¹³ Индейка пошла на взлет: что мешает российским производителям удовлетворить растущий спрос.

— URL: <https://kazanfirst.ru/articles/indejka-poshla-na-vzlet-chto-meshaet-rossijskim-proizvoditelyam-udovletvorit-rastushhij-spros>

¹⁴ Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года (в редакции распоряжений Правительства Российской Федерации от 23.11.2023 № 3309-р, от 07.02.2025 № 253-р).

— URL: <http://government.ru/docs/all/143037/>

¹⁵ Индейководство продолжает уверенный рост. Комбикорма. 2025; (2): 40–41.

<https://elibrary.ru/uhoatv>

¹⁶ Российское индейководство продолжает уверенный рост. Мясной ряд. 2025; (1): 10–13.

<https://elibrary.ru/gflumm>

Практически вся территория России находится в зоне потенциального риска распространения гриппа птиц [4, 31, 32].

Тщательное исследование природы возбудителей и болезней, появление новых биоценозов вкупе с развитием отечественной биологической промышленности стали бы надежным инструментарием для прогнозирования заболеваний и создания вакцин и биологических препаратов для борьбы с ними, а также способствовали бы улучшению продовольственной безопасности в рамках птицеводства. Эти решения требуют подготовки кадров и повышения квалификации специалистов на основе новых научных разработок и опыта работы передовых предприятий [1, 33].

Помимо проблем с племенным материалом и угрозы вирусной инфекции, экономическое состояние птицеводческих предприятий во многом зависит от изменения стоимости целого ряда других используемых ресурсов. Наиболее острыми углами для индейководства в краткосрочной перспективе могут быть нестабильность цен на корма, ветеринарные препараты, энергоносители и тару (упаковку), цены на которые значительно выросли за последние годы, а также нехватка рабочего персонала [1, 34–38].

Выводы/Conclusions

Мясо индейки обладает высоким потенциалом и может в ближайшей перспективе стать одной из ключевых альтернатив традиционным видам мясного сырья в отечественной мясопереработке.

¹⁷ Российское индейководство продолжает уверенный рост. Итоги 2024 года: рейтинг и анализ. Эффективное животноводство. 2025; (2): 25–27.
<https://elibrary.ru/ostmab>

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. Фисинин В. Мировое и отечественное птицеводство: реалии и вызовы будущего. *Животноводство России*. 2025; (1): 6–13.
<https://elibrary.ru/geoatn>
2. Созонов И.А., Чепуштанова О.В. Современное состояние птицеводства в России. *Актуальные проблемы животноводства. Сборник тезисов, подготовленный по материалам круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 65–66.
<https://elibrary.ru/bhegss>
3. Харченко А.В., Волков Н.А. Социальная составляющая продовольственной безопасности: доступность питания и его влияние на здоровье человека. *Сборник статей по материалам Ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет. 2025; 793–795.
<https://elibrary.ru/lwxnmy>
4. Сусликова П.С., Салаутин В.В., Дмитриев Н.О. Современное состояние и перспективы использования гуминов в индейководстве. *Современные научные тенденции в ветеринарии. Сборник статей IV Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2025; 235–238.
<https://elibrary.ru/zbocoz>
5. Насонова В.В., Туниева Е.К., Мотовилина А.А., Милеенкова Е.В. Мясо индейки: производство, состав и свойства. *Мясная индустрия*. 2019; (11): 36–40.
<https://elibrary.ru/tdwbat>

Его высокая питательная ценность, богатый витаминно-минеральный состав и низкое содержание жира делают индейку привлекательной для разработки функциональных и специализированных продуктов питания.

Главными проблемами, сдерживающими дальнейшее развитие отрасли, остаются дефицит племенного материала и зависимость от импорта родительских стад. По прогнозам специалистов, доля отечественного генетического фонда может снизиться до 53%, что требует усиления мер государственной поддержки и инвестиционной активности⁴. Несмотря на актуальные и возможные проблемы, специалисты отрасли выражают уверенность, что при условии планомерного внедрения государственных инициатив и стимулирования инвестиций объем производства индейки в России к 2030 г. может достичь 650–700 тыс. т, а экспорт увеличится в 1,5 раза^{12, 17}.

В то же время продолжающаяся панзоотия гриппа птиц остается значительным препятствием для развития промышленного индейководства в стране. По этой причине для долгосрочного развития отрасли необходимо уделять внимание эффективности (увеличению кадрового потенциала и профессионализма коллектива, успешному внедрению на предприятии научных разработок и передового опыта) и биобезопасности (заблаговременному предупреждению болезней, созданию биофабрик по выпуску отечественных вакцин и других ветеринарных препаратов, внедрению инноваций в ветеринарии).

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. Fisinin V. Global and domestic poultry production: realities and challenges of the future. *Animal Husbandry of Russia*. 2025; (1): 6–13 (in Russian).
<https://elibrary.ru/geoatn>
2. Sozonov I.A., Chepushtanova O.V. Current state of poultry farming in Russia. *Actual problems of animal husbandry. Collection of abstracts prepared based on the materials of a round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 65–66 (in Russian).
<https://elibrary.ru/bhegss>
3. Kharchenko A.V., Volkov N.A. The social component of food security: the availability of nutrition and its impact on human health. *Collection of articles based on the materials of the Annual scientific and practical conference of teachers on the results of research for 2024*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University. 2025; 793–795 (in Russian).
<https://elibrary.ru/lwxnmy>
4. Suslikova P.S., Salautin V.V., Dmitriev N.O. The current state and prospects of the use of humins in turkey breeding. *Modern scientific trends in veterinary medicine. Collection of articles of the IV International scientific and practical conference*. Penza: Penza State Agrarian University. 2025; 235–238 (in Russian).
<https://elibrary.ru/zbocoz>
5. Nasonova V.V., Tunieva E.K., Motovilina A.A., Mileenkova E.V. Turkey meat: production, composition and properties. *Meat Industry*. 2019; (11): 36–40 (in Russian).
<https://elibrary.ru/tdwbat>

6. Чубрин В.В., Лопалева Н.Л. Научно-технические разработки в области производства и переработки индейки. *Научно-технологические разработки в области производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Материалы круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 218–219. <https://elibrary.ru/rzsjjs>
7. Шлыков С.Н., Омаров Р.С., Сычева О.В., Скорбина Е.А., Трубина И.А. Мясо индейки как основа мясопродуктов для спортивного питания. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*. 2023; (4): 62–72. <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2023-4-62-72>
8. Борисова В.Л., Сазонова Е.А. Мясо индейки — благоприятная основа для здорового питания. *Место и роль аграрной науки в обеспечении продовольственной безопасности страны. Сборник материалов Международной научной конференции*. Смоленск: Смоленская ГСХА. 2022; 33–38. <https://elibrary.ru/shfxcn>
9. Патиева А.М., Патиева С.В., Зыкова А.В. Медико-биологическое обоснование использование мяса индейки для питания детей с 1 года до 3 лет. *Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России. Сборник статей Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2020; 2: 196–199. <https://elibrary.ru/dhoqnk>
10. Ребезов Я.М., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Химический состав мяса индеек разных породных групп. *Обеспечение технологического суверенитета АПК: подходы, проблемы, решения. Сборник статей Международной научно-методической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023; 193–195. <https://elibrary.ru/qnyotj>
11. Ребезов Я.М., Харлап С.Ю., Горелик О.В., Абдулхаликов Р.З. Морфологический состав мяса индеек средних кроссов разных пород. *Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты. Сборник научных трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова. 2021; 2: 234–237. <https://elibrary.ru/myeerl>
12. Штанько Д.С., Чепуштанова О.В. Особенности мяса индеек. *Актуальные вопросы по производству и переработке сельскохозяйственной продукции. Сборник тезисов, подготовленный в рамках круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023; 1: 47–48. <https://elibrary.ru/yiypzq>
13. Ребезов Я.М., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Сравнительный анализ химического состава мяса индеек кроссов белая широкогрудая и Хайбрид. *АПК России*. 2022; 29(2): 226–234. <https://doi.org/10.55934/10.55934/2587-8824-2022-29-2-226-234>
14. Карабаджак Е.С., Чепуштанова О.В. Производство мяса птицы под маркой «халаль». *Приоритетные направления развития аграрной науки и технологий. Сборник тезисов научно-практической конференции, посвященной 75-летию факультета биотехнологии и пищевой инженерии*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 1: 641–642. <https://elibrary.ru/ztarie>
15. Мукашева А.А., Ибраев А.С., Болатбекова И.К. Соблюдение баланса свободы вероисповедания и прав животных. *Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Серия: Право*. 2023; (3): 143–154. <https://www.elibrary.ru/edzqnx>
16. Кійко В., Янчик М., Божко А. Халальні та кошерні харчові продукти: виробництво і сертифікація. *Товари і ринки*. 2022; (1): 30–45. [https://doi.org/10.31617/2.2022\(41\)03](https://doi.org/10.31617/2.2022(41)03)
17. Губа Е.Н., Бабаков А.Н., Говорухина Ю.А., Желтикова М.В. Рынок халальной продукции: от религиозных норм к глобальным трендам, халаль как маркер качества. *Новые вызовы для экономики России: актуальные подходы и перспективные решения. Сборник научных трудов студентов IX Международной межвузовской научно-практической конференции преподавателей и студентов*. Краснодар: Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова (Краснодарский филиал). 2025; 101–114. <https://elibrary.ru/vczrqi>
18. Зинченко Д.А. Характеристика пород индеек генофондного стада. *Наука на современном этапе ее развития: актуальность и инновации. Международная научно-практическая конференция*. Ставрополь: Агрус. 2023; 231–238. <https://elibrary.ru/dfsctg>
6. Chubrin V.V., Lopaeva N.L. Scientific and technical developments in the field of turkey production and processing. *Scientific and technological developments in the field of production and processing of agricultural products. Proceedings of the round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 218–219 (in Russian). <https://elibrary.ru/rzsjjs>
7. Shlykov S.N., Omarov R.S., Sycheva O.V., Skorбина E.A., Trubina I.A. Turkey meat as the meat products basis for sports nutrition. *Technologies of the food and processing industry of AIC — healthy food*. 2023; (4): 62–72 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2023-4-62-72>
8. Borisova V.L., Sazonova E.A. Turkey meat — a favorable basis for healthy nutrition. *The place and role of agricultural science in ensuring food security of the country. Collection of materials of the International scientific conference*. Smolensk: Smolensk State Agricultural Academy. 2022; 33–38 (in Russian). <https://elibrary.ru/shfxcn>
9. Patieva A.M., Patieva S.V., Zyкова A.V. Medical and biological justification for the use of turkey meat for feeding children from 1 to 3 years of age. *The contribution of young scientists to the innovative development of the Russian agro-industrial complex. Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of young scientists*. Penza: Penza State Agrarian University. 2020; 2: 196–199 (in Russian). <https://elibrary.ru/dhoqnk>
10. Rebezov Ya.M., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Chemical composition of turkey meat of different breed groups. *Ensuring technological sovereignty of the agro-industrial complex: approaches, problems, solutions. Collection of articles from the International scientific and methodological conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2023; 193–195 (in Russian). <https://elibrary.ru/qnyotj>
11. Rebezov Ya.M., Kharlap S.Yu., Gorelik O.V., Abdulkhalikov R.Z. Morphological composition of meat of medium cross turkeys of different breed groups. *Current issues in agricultural science: applied and research aspects. Collection of scientific papers of the All-Russian (national) scientific and practical conference*. Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 2021; 2: 234–237 (in Russian). <https://elibrary.ru/myeerl>
12. Shtanko D.S., Chepushtanova O.V. Features of turkey meat. *Current issues in the production and processing of agricultural products. Collection of abstracts prepared within the framework of a round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2023; 1: 47–48 (in Russian). <https://elibrary.ru/yiypzq>
13. Rebezov Ya.M., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Comparative analysis of the chemical composition of meat of cross-country turkeys Broad Breasted White and Hybrid. *Agro-industrial complex of Russia*. 2022; 29(2): 226–234 (in Russian). <https://doi.org/10.55934/10.55934/2587-8824-2022-29-2-226-234>
14. Karabadzak E.S., Chepushtanova O.V. Production of poultry meat under the “halal” brand. *Priority areas for the development of agricultural science and technology. Collection of abstracts of the scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Faculty of Biotechnology and Food Engineering*. Ekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 1: 641–642 (in Russian). <https://elibrary.ru/ztarie>
15. Mukasheva A.A., Ibraev A.S., Bolatbekova I.K. Maintaining a balance of religious freedom and animal rights. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Law Series*. 2023; (3): 143–154 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/edzqnx>
16. Kiško V., Yanchyk M., Bozhko A. Halal and kosher foodstuffs: production and certification. *Commodities and Markets*. 2022; (1): 30–45 (in Ukrainian). [https://doi.org/10.31617/2.2022\(41\)03](https://doi.org/10.31617/2.2022(41)03)
17. Guba E.N., Babakov A.N., Govorukhina Yu.A., Zheltikova M.V. Halal product market: from religious norms to global trends, halal as a quality marker. *New challenges for the Russian economy: current approaches and promising solutions. Collection of scientific papers of students of the IX International interuniversity scientific and practical conference of teachers and students*. Krasnodar: Russian University of Economics (Krasnodar branch). 2025; 101–114 (in Russian). <https://elibrary.ru/vczrqi>
18. Zinchenko D.A. Characteristics of turkey breeds of the gene pool flock. *Science at the current stage of its development: relevance and innovation. International scientific and practical conference*. Stavropol: Agrus. 2023; 231–238 (in Russian). <https://elibrary.ru/dfsctg>

19. Романенко И.В., Погодаев В.А. Селекционные признаки чистопородных и гибридных индеек. *Проблемы биотехнологии, селекции, кормления и кормопроизводства современного животноводства. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Национальной академии наук Беларуси*. Жодино: Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству. 2023; 89–93. <https://elibrary.ru/cyxqim>
20. Борисова В.Л., Сазонова Е.А., Балихина Н.А. Перспективы развития производства мяса индейки в России. *Проблемы и перспективы развития АПК и сельских территорий. Сборник материалов Международной научной конференции*. Смоленск: Смоленская ГСХА. 2022; 1: 23–26. <https://elibrary.ru/ztiano>
21. Ивашин И.С. Проблемы и перспективы развития производства мяса индеек. Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса. *Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2024; 2: 196–199. <https://elibrary.ru/wmihay>
22. Рубцова А.А. Производство мяса индейки. *Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России. Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2021; 1: 157–159. <https://elibrary.ru/bnvrod>
23. Броун Е. Рынок мяса птицы: оценка ключевых показателей. *Мясные технологии*. 2025; (5): 8–10. <https://elibrary.ru/lbkjwq>
24. Ибатова Э. Почетное серебро на мировом рынке мяса индейки. *Мясные технологии*. 2024; (5): 16–18. <https://elibrary.ru/zqasbh>
25. Хайруллина О.И. Мировой рынок мяса птицы: прогноз, анализ тенденций и перспектив. *Продовольственная политика и безопасность*. 2025; 12(2): 511–526. <https://doi.org/10.18334/ppib.12.2.121995>
26. Давлеев А. Российское индейководство продолжает уверенный рост. *Мясная индустрия*. 2025; (2): 52. <https://elibrary.ru/vgjqlo>
27. Шабаетова А.Р., Балалаева И.В. Производство мяса индейки в условиях ООО «АПК «Дамате». *Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России. Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2021; 1: 153–157. <https://elibrary.ru/iqyoxu>
28. Смирнова Е.Н. Производство мяса индейки в России. *Научно-исследовательский центр Science Discovery*. 2022; (11): 227–230. <https://elibrary.ru/seclwp>
29. Нарзулаев С.Б. Вирус гриппа птиц как основная угроза ветеринарному благополучию промышленного и домашнего птицеводству [sic!] (обзор литературы). *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий. Сборник IX Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием*. Новосибирск: Золотой колос. 2024; 1007–1012. <https://elibrary.ru/obpwk>
30. Бондарев А.Я., Евстафьев Д.М. Высокопатогенный грипп птиц: современное состояние, распространение вируса и меры борьбы. *Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий. Сборник VIII Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием*. Новосибирск: Золотой колос. 2023; 331–335. <https://elibrary.ru/pcylcx>
31. Рябцева В.А., Лоренгель Т.И. Обзор эпизоотологической ситуации по высокопатогенному гриппу птиц в России. *Современные тенденции развития ветеринарной науки и практики. Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции факультета ветеринарной медицины ИВМиБ ФГБОУ ВО «Омский ГАУ»*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2024; 157–161. <https://elibrary.ru/kdlqrs>
32. Горпинченко К.Н., Посошкова П.С. Анализ эпизоотической ситуации по птичьему гриппу в Российской Федерации. *Тенденции развития науки и образования*. 2024; 110(12): 8–11. <https://www.elibrary.ru/tktjcy>
33. Курмакаева Т.В., Ребезов М.Б., Колесниченко И.С. Взаимодействие науки, образования и бизнеса при подготовке кадров в системе ДПО. *Государственно-частное партнерство в сфере АПК: приоритетные направления и механизмы реализации. Материалы Международной научно-практической конференции*. М. 2017; 123–125. <https://www.elibrary.ru/xmnyjt>
19. Romanenko I.V., Pogodaev V.A. Breeding characteristics of purebred and hybrid turkeys. *Problems of biotechnology, breeding, feeding, and forage production in modern animal husbandry. Collection of articles based on the materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the National Academy of Sciences of Belarus*. Zhodino: Scientific and Practical Center for Animal Husbandry of the National Academy of Sciences of Belarus. 2023; 89–93 (in Russian). <https://elibrary.ru/cyxqim>
20. Borisova V.L., Sazonova E.A., Balikhina N.A. Prospects for the development of turkey meat production in Russia. *Problems and prospects for the development of the agro-industrial complex and rural areas. Collection of materials of the International scientific conference*. Smolensk: Smolensk State Agricultural Academy. 2022; 1: 23–26 (in Russian). <https://elibrary.ru/ztiano>
21. Ivashin I.S. Problems and prospects for production development of turkey meat. *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; 2: 196–199 (in Russian). <https://elibrary.ru/wmihay>
22. Rubtsova A.A. Turkey meat production by. *The contribution of young scientists to the innovative development of the Russian agro-industrial complex. Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of young scientists*. Penza: Penza State Agrarian University. 2021; 1: 157–159 (in Russian). <https://elibrary.ru/bnvrod>
23. Broun E. Poultry meat market: assessment of key indicators. *Meat Technology*. 2025; (5): 8–10 (in Russian). <https://elibrary.ru/lbkjwq>
24. Ibatova E. Honorary silver in the world turkey meat market. *Meat Technology*. 2024; (5): 16–18 (in Russian). <https://elibrary.ru/zqasbh>
25. Khayrullina O.I. World poultry meat market: forecast, analysis of trends and prospects. *Food Policy and Security*. 2025; 12(2): 511–526 (in Russian). <https://doi.org/10.18334/ppib.12.2.121995>
26. Davleev A. Russian turkey breeding continues to grow steadily. *Meat Industry*. 2025; (2): 52 (in Russian). <https://elibrary.ru/vgjqlo>
27. Shabaeva A.R., Balalaeva I.V. Turkey meat production technologies in the conditions of LLC «APK «Damate». *The contribution of young scientists to the innovative development of the Russian agro-industrial complex. Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of young scientists*. Penza: Penza State Agrarian University. 2021; 1: 153–157 (in Russian). <https://elibrary.ru/iqyoxu>
28. Smirnova E.N. Turkey meat production in Russia. *Nauchno-issledovatel'skiy tsentr "Science Discovery"*. 2022; (11): 227–230 (in Russian). <https://elibrary.ru/seclwp>
29. Narzulaev S.B. Avian influenza virus as the main threat to the veterinary welfare of industrial and domestic poultry farming (literature review). *The role of agricultural science in the sustainable development of rural areas. Proceedings of the IX All-Russian (national) scientific conference with international participation*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2024; 1007–1012 (in Russian). <https://elibrary.ru/obpwk>
30. Bondarev A.Ya., Evstafiev D.M. Highly pathogenic avian influenza: current status, virus spread, and control measures. *The role of agricultural science in the sustainable development of rural areas. Proceedings of the VIII All-Russian (national) scientific conference with international participation*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2023; 331–335 (in Russian). <https://elibrary.ru/pcylcx>
31. Ryabtseva V.A., Lorengel T.I. Review of the epizootological situation of highly pathogenic avian influenza in Russia. *Current trends in the development of veterinary science and practice. Collection of materials of the All-Russian (national) Scientific and Practical Conference of the Faculty of Veterinary Medicine of the Institute of Veterinary Medicine of the Omsk State Agrarian University*. Omsk: Omsk State Agrarian University. 2024; 157–161 (in Russian). <https://elibrary.ru/kdlqrs>
32. Gorpinchenko K.N., Pososhkova P.S. Analysis of the epizootic situation of avian influenza in the Russian Federation. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2024; 110(12): 8–11 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/tktjcy>
33. Kurmakayeva T.V., Rebezov M.B., Kolesnichenko I.S. Interaction of science, education and business in training personnel in the system of additional professional education. *Public-private partnership in the sphere of agro-industrial complex: priority areas and implementation mechanisms. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Moscow. 2017; 123–125 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/xmnyjt>

34. Конькова Е.А., Александрова С.А., Стахеева Л.М. Оценка экономической эффективности индейководства в Свердловской области. *Экономика, управление, право: актуальные тренды и векторы развития. Материалы Ежегодной II внутривузовской научно-практической конференции*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 34–39. <https://elibrary.ru/btircy>
35. Мурзина Д.И., Виноградова Н.Д. Эффективность производства мяса индейки кросса БИГ-6. *Актуальные вопросы развития науки и технологий. Сборник статей молодых ученых*. Караваево: Костромская государственная сельскохозяйственная академия. 2025; 277–290. <https://elibrary.ru/miornj>
36. Украинская О.А., Панкратов С.В. Проблемы и перспективы развития российского индейководства. *Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии*. 2024; (3): 105–110. <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2024.3.105>
37. Ковтун А.А., Лысенко Ю.А., Лунева А.В. Современные способы повышения продуктивности индейки. *Современные проблемы в животноводстве: состояние, решения, перспективы. Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию академика В.Г. Рядчикова*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет. 2024; 403–407. <https://elibrary.ru/ngrfxg>
38. Сафиуллин Р.Т., Чалышева Э.И. Экономический ущерб от спонтанного эймериоза молодняка индеек. *Российский паразитологический журнал*. 2025; 19(2): 218–225. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-2-218-225>

ОБ АВТОРАХ

Ярослав Максимович Ребезов¹

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

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 кафедры биотехнологии и пищевых продуктов²;
- доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник³
rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Руслан Рауфович Хайбрахманов⁴

кандидат юридических наук, доцент
9629056175@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6848-4521>

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

⁴Государственный университет по землеустройству, ул. Казакова, 15, Москва, 105064, Россия

34. Konkova E.A., Aleksandrova S.A., Stakheeva L.M. Assessment of the economic efficiency of turkey farming in the Sverdlovsk region. *Economy, management, law: current trends and development vectors. Proceedings of the Annual II intra-university scientific and practical conference*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 34–39 (in Russian). <https://elibrary.ru/btircy>

35. Murzina D.I., Vinogradova N.D. Efficiency of production of BIG-6 cross turkey meat. *Actual issues in the development of science and technology: Collection of articles of young scientists*. Karavayevo: Kostroma State Agricultural Academy. 2025; 277–290 (in Russian). <https://elibrary.ru/miornj>

36. Ukrainskaya O.A., Pankratov S.V. Problems and perspectives of development of Russian turkey breeding. *Legal regulation in veterinary medicine*. 2024; (3): 105–110 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2024.3.105>

37. Kovtun A.A., Lysenko Yu.A., Luneva A.V. Modern ways to increase turkey productivity. *Modern problems in animal husbandry: status, solutions, prospects. Collection of articles based on the materials of the II International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of Academician V.G. Ryadchikov*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University. 2024; 403–407 (in Russian). <https://elibrary.ru/ngrfxg>

38. Safiullin R.T., Chalysheva E.I. Economic damage from spontaneous eimeriosis in young turkeys. *Russian Journal of Parasitology*. 2025; 19(2): 218–225 (in Russian). <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-2-218-225>

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
yarslavreb@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1121-8139>

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 of the Department of Biotechnology and Food Products²;
- Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor, Chief Researcher³
rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Ruslan Raufovich Khaibrakhmanov⁴

Candidate of Legal Sciences, Associate Professor
9629056175@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6848-4521>

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

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

³V.M. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, 26 Talalikhin Str., Moscow, 109316, Russia

⁴State University of Land Use Planning, 15 Kazakov Str., Moscow, 105064, Russia

Стероидогенная активность яичников коров в зависимости от результативности искусственного осеменения и полиморфизма гена *DIO1*

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Низкая фертильность молочных коров связана с эмбриональной смертностью, которая зависит от баланса половых стероидных гормонов, взаимодействующих с гормонами щитовидной железы. Полиморфизм гена *DIO1*, отвечающего за метаболизм тиреоидных гормонов, влияет на репродуктивную функцию.

Методы. Для изучения динамики содержания в крови прогестерона (P4) и эстрадиол-17β (E2) в связи с результативностью искусственного осеменения и полиморфизмом гена *DIO1* были использованы 30 коров черно-пестрой породы 2–4-го отела. Взятие крови проводили в день осеменения и через 7, 14, 21 и 33 дня. Концентрацию гормонов в сыворотке крови определяли методом ИФА. На 33-й день (по результатам УЗИ) коровы были разделены на группы — стельные (n = 18) и нестельные (n = 12). Методом ПЦР-РВ были определены три генотипа животных: CC (n = 13), CG (n = 10) и GG (n = 7).

Результаты. После плодотворного осеменения концентрация P4 в крови коров непрерывно возрастала (в 13,7 раза) в течение пяти недель, тогда как при безрезультативном осеменении ее повышение (в 5,9 раза) наблюдалось только между 21 и 33 днями. При этом уровень E2 в день осеменения был в 1,4 раза выше у нестельных, чем у стельных особей. Кроме того, в течение трех недель после осеменения содержание E2 в крови коров с генотипом CG в 1,5–1,9 раза превышало таковое у животных с генотипом CC. Полученные результаты будут полезны для совершенствования прогностической оценки и ранней диагностики результативности искусственного осеменения коров.

Ключевые слова: коровы черно-пестрой породы, фертильность, эмбриональная смертность, прогестерон, эстрадиол-17β, тиреоидные гормоны, полиморфизм гена *DIO1*

Для цитирования: Митяшова О.С., Лебедева И.Ю. Стероидогенная активность яичников коров в зависимости от результативности искусственного осеменения и полиморфизма гена *DIO1*. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 48–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-48-53>

Steroidogenic activity of bovine ovaries depending on the effectiveness of artificial insemination and *DIO1* gene polymorphism

ABSTRACT

Relevance. Low fertility of dairy cows is associated with embryonic mortality, which depends on the balance of sex steroids interacting with thyroid hormones. Polymorphism of the *DIO1* gene, responsible for the metabolism of thyroid hormones, also affects reproductive function.

Methods. To study the dynamics of the progesterone (P4) and estradiol-17β (E2) blood content in connection with the effectiveness of artificial insemination and the *DIO1* gene polymorphism, 30 black-and-white cows of the second to fourth calving were used. Blood sampling was performed on the day of insemination and after 7, 14, 21 and 33 days. The concentration of the hormones in the blood serum was determined by ELISA. On the 33rd day, based on the ultrasound results, the cows were divided into groups — pregnant (n = 18) and non-pregnant (n = 12). Using the qPCR method, three genotypes of animals were determined: CC (n = 13), CG (n = 10) and GG (n = 7).

Results. After successful insemination, the P4 concentration in the cows' blood increased continuously (13.7 times) for 5 weeks, whereas after unsuccessful insemination its increase (5.9 times) was observed only between days 21 and 33. Concurrently, the level of E2 on the day of insemination was 1.4 times higher in non-pregnant animals than in pregnant animals. Besides, within 3 weeks after insemination, the E2 content in the blood of cows with the CG genotype was 1.5–1.9 times higher than that in animals with the CC genotype. The findings will be useful for improving the prognostic assessment and early diagnostics of the artificial insemination effectiveness in cows.

Key words: cows of the black-and-white breed, fertility, embryonic mortality, progesterone, estradiol-17β, thyroid hormones, *DIO1* gene polymorphism

For citation: Mityashova O.S., Lebedeva I.Yu. Steroidogenic activity of bovine ovaries depending on the effectiveness of artificial insemination and *DIO1* gene polymorphism. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 48–53 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-48-53>

Введение/Introduction

Низкая фертильность молочного скота представляет собой комплексную проблему, обусловленную множеством факторов. Она может быть связана с нарушениями в развитии фолликулов и сопутствующим снижением качества ооцитов, а также с неблагоприятной средой репродуктивного тракта, неспособной обеспечить нормальное развитие эмбриона, или с комбинацией этих условий [1].

В случае оплодотворения яйцеклетки все вышеперечисленные факторы будут приводить к эмбриональным потерям, большая часть которых (до 70–80%) происходит в первые три недели стельности [2]. При этом потеря беременности является одной из ключевых причин пониженного уровня воспроизводства стада и, как следствие, недостаточной экономической эффективности животноводства [3].

Как известно, успешное зачатие и сохранение стельности зависят от эндокринного статуса животного, в первую очередь от уровня половых стероидных гормонов [4]. Прогестерон (P4) играет важнейшую роль в наступлении и поддержании беременности, регулируя качество ооцитов и состояние эндометрия матки. Повышенный уровень P4 в организме в ранние сроки после оплодотворения способствует ускорению развития эмбриона, увеличению выработки интерферона-тау и повышению вероятности успешной беременности [1]. Напротив, его низкое содержание в крови и молоке коров на 10–30-й день после искусственного осеменения связано с потерей стельности [4, 5].

Эстрадиол-17 β (E2) регулирует рецептивность эндометрия, эндометриальный синтез рецепторов прогестерона и другие изменения в матке, необходимые для имплантации эмбриона у крупного рогатого скота (КРС), как и у других видов млекопитающих [6–8]. Показано, что повышенное содержание E2 в крови коров-реципиентов и введение им синтетического аналога этого гормона в преовуляторный период обуславливают возрастание вероятности имплантации при последующей пересадке эмбрионов [9]. В то же время для лучшей сохранности беременности необходимо постовуляторное снижение концентрации E2, не позднее чем на 14–17-й день после искусственного осеменения коров [4].

К настоящему времени установлено наличие у самок сложного взаимодействия между гормонами репродуктивной системы и тиреоидными гормонами, которое реализуется на разных уровнях: организменном, клеточном и молекулярном [10]. В связи с этим особую актуальность представляет вопрос участия гормонов щитовидной железы в поддержании беременности путем модуляции воздействия овариальных стероидных гормонов на репродуктивные органы. При этом на ранних стадиях беременности наиболее важен тиреоидный статус матери, поскольку до 10-й недели развития эмбрионы не синтезируют собственный

тироксин и получают его из материнского организма вплоть до 18–20-й недели гестации [11].

Ранее авторами было обнаружено повышение уровней гормонов тиреоидной оси в течение 2 недель после безрезультативного осеменения коров черно-пестрой породы, которое не наблюдалось у стельных животных [12]. Следовательно, одной из причин эмбриональной потери могло служить наблюдаемое в период имплантации возрастание активности тиреоидной системы. Кроме того, при использовании телок голштинской породы в качестве реципиентов при пересадке эмбрионов на 18-й день после овуляции выявлено более низкое содержание тиреотропного гормона и трийодтиронина в крови стельных животных по сравнению с нестельными [13]. Эти данные подтверждают, что тиреоидный статус КРС играет важную роль в сохранении беременности, по крайней мере на ее ранних стадиях.

Активность тиреоидной системы зависит от интенсивности метаболизма гормонов щитовидной железы, который регулируется дейодиназами трех типов, причем дейодиназа 1-го типа (DIO1) катализирует конверсию тироксина как в активный трийодтиронин, так и в его неактивную форму — реверсивный трийодтиронин [14].

Авторами было показано, что репродуктивная способность и тиреоидный профиль крови у коров черно-пестрой породы с полиморфными вариантами гена *DIO1* различаются. При этом результативность осеменения животных была выше в случае отсутствия аллеля G в позиции 13149 гена *DIO1* [15]. Остается неясным, влияет ли изменение тиреоидного статуса коров на сохранение стельности непосредственно или путем модуляции действия половых стероидных гормонов.

Цель настоящей работы — изучение участия овариальных стероидных гормонов в реализации влияния тиреоидной системы на фертильность КРС.

Была охарактеризована динамика содержания в крови прогестерона и эстрадиола-17 β в течение 5 недель после искусственного осеменения коров черно-пестрой породы в зависимости от наличия стельности и полиморфизма гена *DIO1*.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в 2019 году на коровах черно-пестрой голштинизированной породы 2–4-го отёла, содержащихся в условиях экспериментального хозяйства «Клёново-Чегодаево» (г. Москва).

Уровень продуктивности животных варьировал от 5,3 до 7,5 тыс. кг молока за 305 дней лактации ($n = 30$). Все животные получали одинаковый рацион в соответствии с их продуктивностью и зоотехническими нормами. В эксперименте использовали коров без клинических признаков метаболических нарушений и послеотёльных гинекологических заболеваний, как описано ранее [12].

Необходимым условием включения животных в эксперимент служило возобновление эстрально-го цикла до 13-й недели после отёла. Все исследования проводили согласно принципам ветеринарной медицинской этики¹ и правилам по биоэтике, принятым в ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Осеменение животных осуществляли после синхронизации половой охоты по схеме Ovsynch [16]. В день осеменения (0-й день), а также на 7-й, 14-й, 21-й и 33-й дни после искусственного осеменения у коров перед утренним кормлением брали кровь из хвостовой вены с использованием вакуумной системы Apexlab (Apex Laboratories, Китай). Полученную из крови сыворотку замораживали и хранили до проведения анализа при -20 °С. На 33-й день после УЗИ-диагностики с использованием сканера CTS-800 (SIUI, Китай) животных разделили на две группы: I — стельные (n = 18) и II — нестельные (n = 12) коровы.

Дополнительно у животных была взята кровь для получения ДНК с использованием коммерческого набора ДНК «Экстрем-1» (ООО «Синтол», Россия). Полиморфизм гена *DIO1* в позиции 13149 анализировали методом ПЦР в режиме реального времени, как описано ранее [15]. Частота генотипов составляла для: CC — 43,3% (n = 13), CG — 33,3% (n = 10), GG — 23,3% (n = 7).

Концентрацию гормонов в сыворотке крови определяли иммуноферментным методом с использованием коммерческих наборов реагентов (ООО «Хема», Россия). Анализы проводили в двух параллельных повторях. Коэффициент вариации не превышал 18%, чувствительность метода составляла 0,25 нмоль/л для прогестерона и 0,025 нмоль/л для эстрадиола-17β.

Данные по содержанию гормонов в крови подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа с повторными измерениями с помощью программы SigmaStat 4.0 (Systat Software, Inc., США). Результаты представлены в виде средних значений ± стандартные ошибки.

Внутригрупповым фактором служил день после осеменения, а межгрупповым — принцип деления животных на две (стельные или нестельные) или три (генотипы CC, CG или GG) группы.

Статистическую значимость различий между средними значениями оценивали с помощью критерия Тьюки, считая различия достоверными при $p < 0,05$. Корреляционные отношения определяли с использованием коэффициента Пирсона.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Содержание прогестерона в крови стельных коров возрастало в 3,8 раза ($p < 0,05$) между днем осеменения и 7-м днем после осеменения (рис. 1). В дальнейшем это содержание продолжало расти вплоть до 33-го дня (в 3,6 раза, $p < 0,001$),

Рис. 1. Концентрация прогестерона (P4) в крови стельных (I) и нестельных (II) коров в различные дни после осеменения. Вертикальные отрезки показывают стандартные ошибки средних значений. Средние значения, помеченные индексами, не содержащими одинаковых букв, достоверно различаются в пределах одной группы ($p < 0,001-0,05$). Достоверность различий между группами: *** $p < 0,001$

Fig. 1. Concentration of progesterone (P4) in the blood of pregnant (I) and non-pregnant (II) cows on various days after insemination. Vertical bars show standard errors of the means. Mean values marked with indices that do not contain the same letters differ significantly within one group ($p < 0.001-0.05$). Significance of differences between groups: *** $p < 0.001$

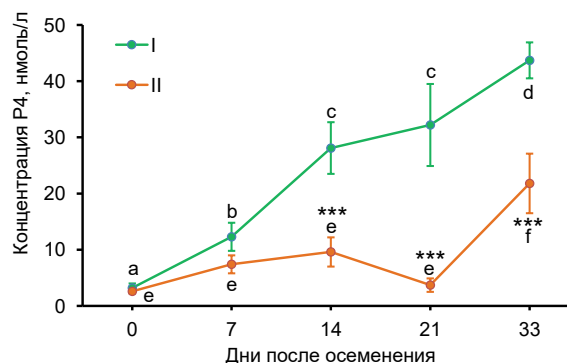
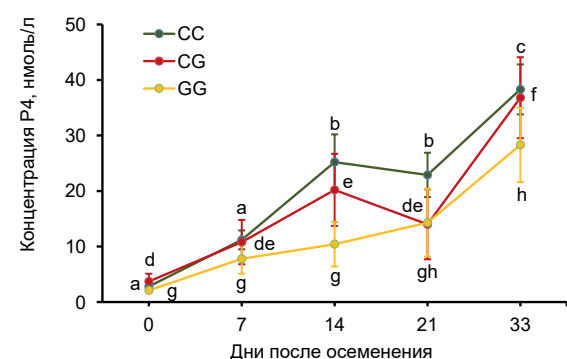


Рис. 2. Концентрация прогестерона (P4) в различные дни после осеменения в крови коров с полиморфными вариантами гена *DIO1*. Все обозначения те же, что и на рисунке 1

Fig. 2. Concentration of progesterone (P4) on different days after insemination in the blood of cows with polymorphic variants of the *DIO1* gene. All designations are the same as in Figure 1



подтверждая нормальное развитие желтого тела и сохранение беременности. Напротив, в случае безрезультативного осеменения повышение уровня прогестерона отмечали только в следующем половом цикле (то есть после 21-го дня), что свидетельствует об отсутствии эмбрионального сигнала, необходимого для поддержания функции желтого тела. При этом на 14-й и 21-й дни после осеменения концентрация прогестерона в крови была, соответственно, в 2,9 и 8,7 раза выше ($p < 0,001$) у стельных коров (I группа) по сравнению с нестельными (II группа). Эти данные в целом согласуются с результатами, полученными другими исследователями в отношении постовульторных профилей прогестерона при разной результативности осеменения КРС [4, 5].

У коров с разными полиморфными вариантами гена *DIO1* концентрация прогестерона в крови существенно не различалась (рис. 2). Однако

¹ The veterinarian-client-patient relationship (VCPR).

<https://www.avma.org/resources-tools/pet-owners/yourvet/veterinarian-client-patient-relationship-vcpr>

только у особей с генотипом СС средний уровень прогестерона на 21-й день после осеменения был достоверно выше (в 8,2 раза, $p < 0,001$), чем в день осеменения, что указывает на функциональную поддержку беременности желтым телом у большинства животных в этой группе. Полученный результат соответствует данным о том, что у черно-пестрых коров с генотипом СС частота стельности при первом осеменении в 2 раза превышала таковую у животных с генотипами СГ и GG [15]. Сохранение лютеальной активности желтого тела, очевидно, являлось следствием сохранения эмбрионального сигнала [4].

Концентрация эстрадиола-17 β в крови коров, сохранивших стельность к концу периода исследований, в день осеменения была в 1,4 раза ниже ($p < 0,05$), чем у бесплодных животных (рис. 3). Следовательно, снижение преовуляторного пика этого гормона у стельных коров происходило раньше, чем у нестельных. Кроме того, к 33-му дню после плодотворного осеменения уровень эстрадиола-17 β в крови особей постепенно уменьшался (в 1,3 раза, $p < 0,05$). В то же время при безрезультативном осеменении снижение этого уровня (в 1,3 раза, $p < 0,01$) наблюдалось на 14-й день и затем продолжалось до 33-го дня.

Необходимо подчеркнуть, что в день осеменения авторами ранее было выявлено повышенное содержание свободного тироксина в крови нестельных особей по сравнению со стельными [12]. Поскольку в обоих исследованиях использована кровь одних и тех же животных, был проведен анализ корреляции между концентрациями эстрадиола-17 β и свободного тироксина.

Установлено, что эти гормональные показатели положительно связаны в течение первых трех недель после искусственного осеменения ($r = 0,44-0,60$ при $p < 0,001-0,05$). Можно предположить, что повышенное содержание свободного тироксина в крови нестельных коров в день осеменения обуславливало замедленное снижения преовуляторного уровня эстрадиола-17 β , поскольку тиреоидные гормоны способны модулировать метаболизм эстрогенов и, таким образом, влиять на их концентрацию в крови [10].

Оказалось, что содержание эстрадиола-17 β в крови исследованных животных зависит от однонуклеотидного полиморфизма гена *DIO1* в позиции 13149 (рис. 4). В течение трех недель после осеменения это содержание у коров с генотипом СГ превышало таковое у особей с генотипом СС: в день осеменения — в 1,9 раза ($p < 0,001$), на 14-й день — в 1,7 раза ($p < 0,01$), на 21-й день — в 1,5 раза ($p < 0,05$). Кроме того, уровень эстрадиола-17 β у коров, гетерозиготных по аллелю G, в день осеменения и через 14 дней был в 1,7–1,8 раза выше ($p < 0,01-0,05$), чем у животных, гомозиготных по этому аллелю.

Важно отметить, что только у коров, гетерозиготных по аллелю С, изменялся баланс между

Рис. 3. Концентрация эстрадиола-17 β (E2) в крови стельных (I) и нестельных (II) коров в различные дни после осеменения. Достоверность различия между группами: * $p < 0,05$. Остальные обозначения те же, что и на рисунке 1

Fig. 3. Concentration of estradiol-17 β (E2) in the blood of pregnant (I) and non-pregnant (II) cows on different days after insemination. Significance of difference between groups: * $p < 0.05$. The remaining designations are the same as in Figure 1

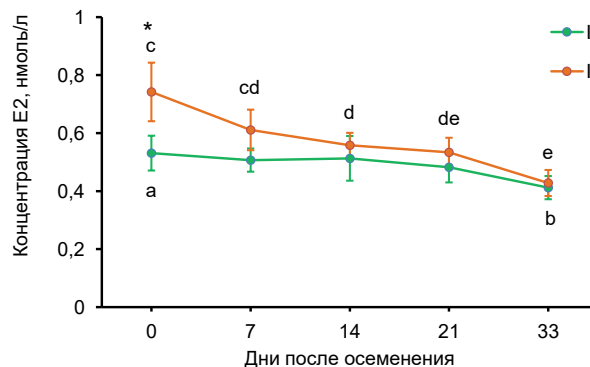
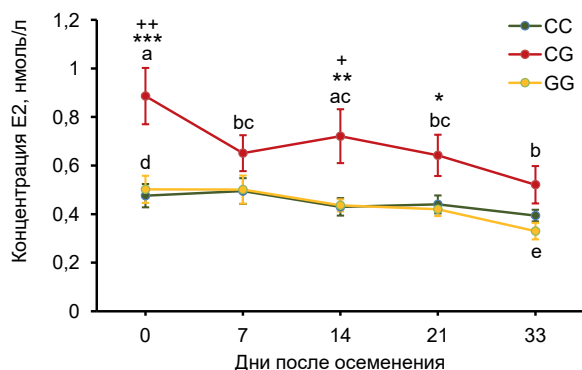


Рис. 4. Концентрация эстрадиола-17 β (E2) в различные дни после осеменения в крови коров с полиморфными вариантами гена *DIO1*. Достоверность различий между группами: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (по сравнению с группой СС); + $p < 0,05$; ++ $p < 0,01$ (по сравнению с группой GG). Остальные обозначения те же, что и на рисунке 1

Fig. 4. Concentration of estradiol-17 β (E2) on different days after insemination in the blood of cows with polymorphic variants of the *DIO1* gene. Significance of differences between groups: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ (compared with the CC group); + $p < 0.05$; ++ $p < 0.01$ (compared with the GG the group). The remaining designations are the same as in Figure 1



активной и неактивной формами трийодтиронина и, следовательно, общая активность тиреоидной системы, а результативность первого осеменения была достоверно ниже по сравнению с особями, гомозиготными по аллелю С [15].

Полученные данные указывают на возможность реализации негативного влияния полиморфного варианта гена *DIO1* в позиции 13149 на фертильность коров черно-пестрой породы, по крайней мере частично, посредством модуляции уровня эстрадиола-17 β в случае генотипа СГ, но не генотипа GG. По-видимому, избыточная концентрация E2 во время оплодотворения и после зачатия может неблагоприятно сказываться на сохранности стельности, что согласуется с результатами других авторов [4].

Выводы/Conclusions

Таким образом, полиморфизм гена *DIO1*, модулирующий активность тиреоидной системы, влияет на содержание эстрадиола-17β в крови коров в течение трех недель после осеменения. При этом содержание данного гормона у животных, оставшихся бесплодными, было повышено в день осеменения.

Эти данные свидетельствуют об участии эстрадиола-17β в опосредовании воздействия тиреоидной системы на фертильность КРС, особенно в перiovуляторный период. В то же время уровень

прогестерона, являющийся надежным маркером сохранения ранней беременности, не зависит от генотипа коров с полиморфными вариантами гена *DIO1*.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение механизма влияния полиморфных вариантов гена *DIO1* на гормональный баланс и совершенствование прогностической оценки и ранней диагностики результативности искусственного осеменения коров на основе мониторинга эндокринного статуса и с учетом особенностей генотипа по гену *DIO1*.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № FGGN-2024-0014).

FUNDING

The research was performed within the framework of a state assignment (topic No. FGGN-2024-0014).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lonergan P., Sánchez J.M. *Symposium review: Progesterone effects on early embryo development in cattle. Journal of Dairy Science.* 2020; 103(9): 8698–8707. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18583>
2. Teja A. *et al.* Early embryonic mortality in cattle and its preventive strategies: A Review. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry.* 2024; 9(5): 141–148. <https://doi.org/10.22271/veterinary.2024.v9.i5c.1667>
3. Wiltbank M.C. *et al.* Pivotal periods for pregnancy loss during the first trimester of gestation in lactating dairy cows. *Theriogenology.* 2016; 86(1): 239–253. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.037>
4. Inskeep E.K. Preovulatory, postovulatory, and postmaternal recognition effects of concentrations of progesterone on embryonic survival in the cow. *Journal of Animal Science.* 2004; 82(S13): E24–E39. https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE24x
5. Nyman S., Gustafsson H., Berglund B. Extent and pattern of pregnancy losses and progesterone levels during gestation in Swedish Red and Swedish Holstein dairy cows. *Acta Veterinaria Scandinavica.* 2018; 60: 68. <https://doi.org/10.1186/s13028-018-0420-6>
6. Bridges G.A., Mussard M.L., Pate J.L., Ott T.L., Hansen T.R., Day M.L. Impact of preovulatory estradiol concentrations on conceptus development and uterine gene expression. *Animal Reproduction Science.* 2012; 133(1–2): 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.06.013>
7. Rawy M. *et al.* Effect of exogenous estradiol Benzoate on uterine blood flow in postpartum dairy cows. *Animal Reproduction Science.* 2018; 192: 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2018.03.001>
8. Perry G.A., Ketchum J.N., Quail L.K. Importance of preovulatory estradiol on uterine receptivity and luteal function. *Animal Reproduction.* 2023; 20(2): e20230061. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2023-0061>
9. Jinks E.M. *et al.* Preovulatory estradiol and the establishment and maintenance of pregnancy in suckled beef cows. *Journal of Animal Science.* 2013; 91(3): 1176–1185. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5611>
10. Ren B., Zhu Y. A New Perspective on Thyroid Hormones: Crosstalk with Reproductive Hormones in Females. *International Journal of Molecular Sciences.* 2022; 23(5): 2708. <https://doi.org/10.3390/ijms23052708>
11. Korevaar T.I.M., Medici M., Visser T.J., Peeters R.P. Thyroid disease in pregnancy: new insights in diagnosis and clinical management. *Nature Reviews Endocrinology.* 2017; 13(10): 610–622. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2017.93>
12. Митяшова О.С., Алейникова О.В., Лебедева И.Ю. Активность тиреоидной системы после искусственного осеменения коров черно-пестрой породы. *Достижения науки и техники АПК.* 2024; 38(10): 97–102. <https://elibrary.ru/cszaux>

REFERENCES

1. Lonergan P., Sánchez J.M. *Symposium review: Progesterone effects on early embryo development in cattle. Journal of Dairy Science.* 2020; 103(9): 8698–8707. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18583>
2. Teja A. *et al.* Early embryonic mortality in cattle and its preventive strategies: A Review. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry.* 2024; 9(5): 141–148. <https://doi.org/10.22271/veterinary.2024.v9.i5c.1667>
3. Wiltbank M.C. *et al.* Pivotal periods for pregnancy loss during the first trimester of gestation in lactating dairy cows. *Theriogenology.* 2016; 86(1): 239–253. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.037>
4. Inskeep E.K. Preovulatory, postovulatory, and postmaternal recognition effects of concentrations of progesterone on embryonic survival in the cow. *Journal of Animal Science.* 2004; 82(S13): E24–E39. https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE24x
5. Nyman S., Gustafsson H., Berglund B. Extent and pattern of pregnancy losses and progesterone levels during gestation in Swedish Red and Swedish Holstein dairy cows. *Acta Veterinaria Scandinavica.* 2018; 60: 68. <https://doi.org/10.1186/s13028-018-0420-6>
6. Bridges G.A., Mussard M.L., Pate J.L., Ott T.L., Hansen T.R., Day M.L. Impact of preovulatory estradiol concentrations on conceptus development and uterine gene expression. *Animal Reproduction Science.* 2012; 133(1–2): 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.06.013>
7. Rawy M. *et al.* Effect of exogenous estradiol Benzoate on uterine blood flow in postpartum dairy cows. *Animal Reproduction Science.* 2018; 192: 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2018.03.001>
8. Perry G.A., Ketchum J.N., Quail L.K. Importance of preovulatory estradiol on uterine receptivity and luteal function. *Animal Reproduction.* 2023; 20(2): e20230061. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2023-0061>
9. Jinks E.M. *et al.* Preovulatory estradiol and the establishment and maintenance of pregnancy in suckled beef cows. *Journal of Animal Science.* 2013; 91(3): 1176–1185. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5611>
10. Ren B., Zhu Y. A New Perspective on Thyroid Hormones: Crosstalk with Reproductive Hormones in Females. *International Journal of Molecular Sciences.* 2022; 23(5): 2708. <https://doi.org/10.3390/ijms23052708>
11. Korevaar T.I.M., Medici M., Visser T.J., Peeters R.P. Thyroid disease in pregnancy: new insights in diagnosis and clinical management. *Nature Reviews Endocrinology.* 2017; 13(10): 610–622. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2017.93>
12. Mityashova O.S., Aleynikova O.V., Lebedeva I.Yu. Activity of the thyroid system after artificial insemination of Black-and-White cows. *Achievements of science and technology in agribusiness.* 2024; 38(10): 97–102 (in Russian). <https://elibrary.ru/cszaux>

13. Meyerholz M.M. *et al.* Peripheral thyroid hormone levels and hepatic thyroid hormone deiodinase gene expression in dairy heifers on the day of ovulation and during the early peri-implantation period. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2015; 58: 52. <https://doi.org/10.1186/s13028-016-0231-6>

14. Brown E.D.L., Obeng-Gyasi B., Hall J.E., Shekhar S. The Thyroid Hormone Axis and Female Reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(12): 9815. <https://doi.org/10.3390/ijms24129815>

15. Kostyunina O.V., Mityashova O.S., Bardukov N.V., Aleynikova O.V., Lebedeva I.Y. *DIO1* Gene Polymorphism Is Associated with Thyroid Profiles and Reproductive Performance in Dairy Cows. *Agriculture*. 2023; 13(2): 398. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020398>

16. Христиановский П.И., Сеитов М.С., Платонов С.А., Медетов Е.С., Алдыаров Т.Б. Сравнительный анализ эффективности фронтального осеменения коров при различных схемах синхронизации половой охоты. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021; (6): 217–221. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-92-6-217-221>

13. Meyerholz M.M. *et al.* Peripheral thyroid hormone levels and hepatic thyroid hormone deiodinase gene expression in dairy heifers on the day of ovulation and during the early peri-implantation period. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2015; 58: 52. <https://doi.org/10.1186/s13028-016-0231-6>

14. Brown E.D.L., Obeng-Gyasi B., Hall J.E., Shekhar S. The Thyroid Hormone Axis and Female Reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(12): 9815. <https://doi.org/10.3390/ijms24129815>

15. Kostyunina O.V., Mityashova O.S., Bardukov N.V., Aleynikova O.V., Lebedeva I.Y. *DIO1* Gene Polymorphism Is Associated with Thyroid Profiles and Reproductive Performance in Dairy Cows. *Agriculture*. 2023; 13(2): 398. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020398>

16. Khristianovsky P.I., Seitov M.S., Platonov S.A., Medetov E.S., Aldyarov T.B. Comparative analysis of the effectiveness of frontal insemination of cows with different schemes of synchronization of sexual heat. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; (6): 217–221 (in Russian). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-92-6-217-221>

ОБ АВТОРАХ

Ольга Сергеевна Митяшова

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
mityashova_o@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0401-5088>

Ирина Юрьевна Лебедева

доктор биологических наук, главный научный сотрудник,
заведующая лабораторией биологических проблем
репродукции животных
irledv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7815-7900>

Федеральный исследовательский центр
животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста,
пос. Дубровицы, 60, Подольск, Московская обл., 142132,
Россия

ABOUT THE AUTHORS

Olga Sergeevna Mityashova

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
mityashova_o@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0401-5088>

Irina Yurievna Lebedeva

Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher,
Head of the Laboratory of Biological Problems
of Animal Reproduction
irledv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7815-7900>

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,
60 Dubrovitsy village, Podolsk, Moscow region, 142132,
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://agrarnayauka.ru/rassylka-zhurnala/>

» ПОДПИСКА НА АРХИВНЫЕ НОМЕРА
И ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ
на сайте Научной электронной библиотеки
www.elibrary.ru



Оценка генетического разнообразия популяций северных оленей (*Rangifer tarandus*): крупномасштабный скрининг полиморфизмов гена миостатина

РЕЗЮМЕ

Северный олень (*Rangifer tarandus* L.) — ключевой вид циркумполярных экосистем, имеющий важное хозяйственное значение для коренных народов Севера. Несмотря на длительную историю взаимодействия с человеком, вопросы генетической дифференциации между домашними и дикими популяциями остаются дискуссионными. В данной работе впервые проведен массовый скрининг полиморфизмов гена миостатина (*MSTN*) с последующей оценкой уровня генетической дифференциации популяций домашних и диких северных оленей. Исследованная выборка ($n = 958$) представлена особями домашних (ненецкая, эвенская, эвенкийская, чукотская породы, тувинская и монгольская популяции) и диких (тундровая и таежная формы) северных оленей из биоресурсной коллекции СБРК СХЖ ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста. Методом ПЦР в реальном времени получены генотипы SNP (g. 1132348) гена *MSTN*. В результате проведенный анализ распределения генотипов и аллелей таргетного SNP выявил значимые межпопуляционные различия: домашние олени демонстрировали вариативное распределение аллелей: А — 43,5–60,2%, G — 56,5–65,4%, тогда как у диких популяций доминировал аллель А — 67,8–71,1%. Гомозиготный вариант генотипа AA преобладал в дикой (46,1%) популяции по сравнению с домашней (17,95%), что может отражать адаптацию к естественным условиям. Полученные впервые данные вносят вклад в понимание эволюционной динамики вида и представляют ценность для разработки стратегий сохранения генетического разнообразия, внедрения маркер-ассоциированной селекции и формирования научно обоснованных программ управления генетическими ресурсами северного оленя.

Ключевые слова: северный олень, *Rangifer tarandus*, SNP, *MSTN*, ген миостатина, полиморфизм, массовый скрининг, генетическое разнообразие, дифференциация

Для цитирования: Харзинова В.Р., Чурбакова Н.А. Оценка генетического разнообразия популяций северных оленей (*Rangifer tarandus*): крупномасштабный скрининг полиморфизмов гена миостатина. 2025; 400(11): 54–59.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-54-59>

Assessing genetic diversity in reindeer (*Rangifer tarandus*) populations: a large-scale screening of myostatin gene polymorphisms

ABSTRACT

Reindeer (*Rangifer tarandus* L.) is a keystone species of circumpolar ecosystems with significant economic importance for indigenous northern peoples. Despite its long history of interaction with humans, questions regarding genetic differentiation between domestic and wild populations remain debated. This study presents the first mass screening of polymorphisms of the myostatin gene (*MSTN*) with subsequent assessment of the level of genetic differentiation between populations of domestic and wild reindeer. The study sample ($n = 958$) included individuals of domestic breeds (Nenets, Even, Evenki, Chukchi) and populations (Tuva, Mongolian), as well as the wild forms (tundra and taiga) from the bioresource collection of the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. Real-time PCR was used to genotype the target SNP (g. 1132348) in the *MSTN* gene. An analysis of genotype and allele distribution revealed significant interpopulation differences: domestic reindeer showed variable allele frequencies: A — 43,5–60,2%, G — 56,5–65,4%, while wild populations predominantly carried the A allele — 67,8–71,1%. The homozygous AA genotype was more frequent in wild (46,1%) than domestic (17,95%) populations, potentially reflecting adaptation to natural environments. These first-reported findings contribute to understanding the evolutionary dynamics of the species and are valuable for the developing genetic diversity conservation strategies, implementing marker-assisted selection and formulating science-based genetic resource management programs for reindeer.

Key words: reindeer, *Rangifer tarandus*, SNP, myostatin, real-time PCR, large-scale screening, genetic diversity, genetic differentiation

For citation: Kharzinova V.R., Churbakova N.A. Assessing genetic diversity in reindeer (*Rangifer tarandus*) populations: a large-scale screening of myostatin gene polymorphisms. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 54–59 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-54-59>

Введение/Introduction

Северный олень (*Rangifer tarandus* Linnaeus, 1758) — вид копытных с самым большим циркумполярным распространением в северном полушарии, простирающийся на большую часть тундровых и таежных территорий Евразии (Фенноскандия, Сибирь, Монголия) и Северной Америки (Канада, Аляска, Гренландия), и чье прошлое географическое распространение было еще более важным. Охота на оленей и оленеводство являются важными источниками пропитания для человеческих сообществ на протяжении многих веков — начиная с эпохи палеолита и до наших дней [1, 2].

Несмотря на свою значимость, время и детали раннего одомашнивания оленей по-прежнему являются предметом дискуссий ряда ученых [3]. Так, в Сибири были предложены даты около 1500 г. до н. э., в то время как другие исследователи утверждают, что это было намного позже [4, 5].

Наряду с этим в научном сообществе сохраняется дискуссия относительно генетической дифференциации между домашними и дикими формами северного оленя. Этот вопрос имеет принципиальное значение как для понимания процессов доместикации, так и для разработки стратегий сохранения генетических ресурсов вида. Для решения данного вопроса был проведен комплекс генетических исследований, основанный на анализе ДНК-маркеров, как митохондриального [6], так и ядерного [7, 8] геномов.

Большинство исследований генетической дифференциации популяций северного оленя основано на анализе полиморфизма микросателлитных маркеров [8–12]. В дополнение к этому методу различия между одомашненными и дикими популяциями по всему российскому Крайнему Северу были изучены с применением коммерческого SNP-чипа [7]. Полученные данные позволили оценить степень генетической дифференциации между домашними и дикими формами северного оленя. Эти исследования важны для понимания закономерностей генетического разнообразия, процессов интрогрессии и дифференциации между популяциями. Результаты имеют ключевое значение для разработки стратегий сохранения данного вида.

Вместе с тем особый научный интерес представляет исследование генетических механизмов, обеспечивающих уникальные адаптации северного оленя, в частности особенности липидного и мышечного метаболизма, в контексте их роли в дифференциации популяций. Данные адаптации могут служить молекулярными маркерами не только для идентификации эволюционных трендов доместикации, но и реконструкции филогенетических взаимоотношений между популяциями и выявления селективных сигнатур, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками. Северные олени обладают рядом адаптивных особенностей, включая специфический жировой обмен, способность накапливать мышечную массу, сниженный уровень

метаболизма в покое, а также ежегодный цикл роста и сбрасывания рогов, который наблюдается у особей обоих полов [13].

В связи с этим актуальное направление исследований — анализ полиморфизма гена миостатина (*MSTN*), играющего ключевую роль в регуляции мышечного роста, который является актуальным как в контексте изучения генетической изменчивости популяций северного оленя, так и для разработки и внедрения в практику оленеводства элементов маркерной селекции. Ген *MSTN*, относящийся к суперсемейству TGF- β , характеризуется консервативной структурой (3 экзона, 2 интрона) и был детально изучен у различных видов млекопитающих: грызунов [14], людей [15] и нескольких видов домашнего скота [16–20].

Естественные мутации, снижающие количество миостатина и (или) подавляющие его функцию, были выявлены у человека и нескольких пород крупного рогатого скота, овец и собак. Кроме того, в некоторых породах овец и свиней в некодирующих регуляторных областях были выявлены мутации, влияющие на уровень экспрессии гена *MSTN*, которые связаны с ростом, мышечной массой и другими характеристиками туши [20].

Несмотря на обширные данные о полиморфизме гена миостатина у различных видов сельскохозяйственных животных, у северного оленя исследования ни частотного распределения аллелей данного гена, ни его потенциального влияния на генетическую дифференциацию между одомашненными и дикими популяциями до сих пор не проводились.

Цель работы — изучение популяционно-генетической структуры *Rangifer tarandus* посредством масштабного скрининга полиморфизма локуса *MSTN* с последующей оценкой уровня генетической дифференциации популяций домашних и диких северных оленей.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Материалом для исследований служили образцы биологического материала (срез с фронтальной части ушной раковины) домашних и диких северных оленей ($n = 958$), депонированных в УНУ «Банк генетического материала домашних и диких видов животных и птицы» в составе сетевой биоресурсной коллекции СБРК СХЖ (соглашение с Минобрнауки России от 28 сентября 2021 года № 075-15-2021-1037), созданной и поддерживаемой в ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста (Россия). Выборка домашних северных оленей включала животных четырех пород — ненецкой ($n = 479$), эвенской ($n = 64$), эвенкийской ($n = 44$) и чукотской ($n = 147$), а также тувинской ($n = 31$) и монгольской ($n = 39$) популяций.

Выборка диких северных оленей представлена образцами тундровой ($n = 135$) и таежной ($n = 19$) форм. Исследованная выборка была сформирована с учетом необходимости репрезентативного

охвата всего генетического разнообразия северного оленя в России. Геномную ДНК выделяли с помощью коммерческого набора «ДНК-Экстрат-2» (ООО «Синтол», Россия) в соответствии с инструкциями производителя. Концентрацию двухцепочечной ДНК измеряли на флуориметре Qubit 3.0 (Thermo Fisher Scientific (ранее Life Technologies Waltham, MA, USA), Wilmington, DE, USA).

Чистоту ДНК определяли путем оценки коэффициента поглощения A260/A280 на спектрофотометре NanoDrop2000 (Thermo Fisher Scientific, Wilmington, DE, USA). Концентрация ДНК в среднем составила 98,7 нг/мкл.

Полиморфизм SNP (g. 1132348) 3'-области гена миостатина диагностировали с помощью авторской тест-системы на основе ПЦР с детекцией результатов в режиме реального времени (ПЦР-РВ). Данный SNP был идентифицирован посредством анализа данных полногеномного секвенирования по технологии NGS, полиморфизм которого был подтвержден в результате проведения секвенирования по Сэнгеру.

Для амплификации фрагмента гена *MSTN* использовали следующие праймеры и зонды: F 5'-AAGAAGTTTATGATTTCCAGAGTTTGTG-3'; R 5'-CGGCATATGTTGCAATATATTTGAAC-3'; 5'-FAM-AACTAGGAGATCAAATTCATTTAT-BHQ-1-3'; 5'-R6G-AACTGGGAGATCAAATTCATTTAT-BHQ-1-3'. ПЦР проводили в объеме 20 мкл, содержащем буфер 10X Taq Turbo буфер (2 мкл) (ЗАО «Евроген», Россия), H₂O (11.85 мкл), dNTPs (2 мкл, 2.5 mM каждого), смесь праймеров (2 мкл, 10 мкМ), флуоресцентные зонды (1 мкл: 0.5 мкл FAM- и 0.5 мкл R6G-меченых), ДНК-полимеразу SmartTaq (0.15 мкл, 5 ед/мкл) (ЗАО «Диалат», Россия), матричную ДНК (1 мкл, 100 нг/мкл).

Реакцию амплификации проводили на амплификаторе QuantStudio®5 (ThermoFisher Scientific, США) со следующим профилем: предварительная денатурация: 50 °C — 60 сек., 95 °C — 8 мин.; ПЦР-циклы (45): денатурация: 95 °C — 20 сек., отжиг: 66 °C (10 циклов) / 58 °C (35 циклов) — 35 сек., элонгация: 72 °C — 4 сек.

Генотипирование осуществляли по флуоресцентным сигналам с построением многопараметрических графиков в программном обеспечении амплификатора QuantStudio®5. Частоту встречаемости генотипов и аллелей определяли по формуле Е.К. Меркурьевой (1977 г.)¹: $p = n/N$, где p — частота определения генотипа, n — количество особей, имеющих определенный генотип, N — число особей. Частоту отдельных аллелей определяли по формуле:

$$p_A = (2n_{AA} + n_{AB}) / 2N, \quad q_B = (2n_{BB} + n_{AB}) / 2N,$$

где p_A — частота аллеля А, q_B — частота аллеля В, N — общее число аллелей.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

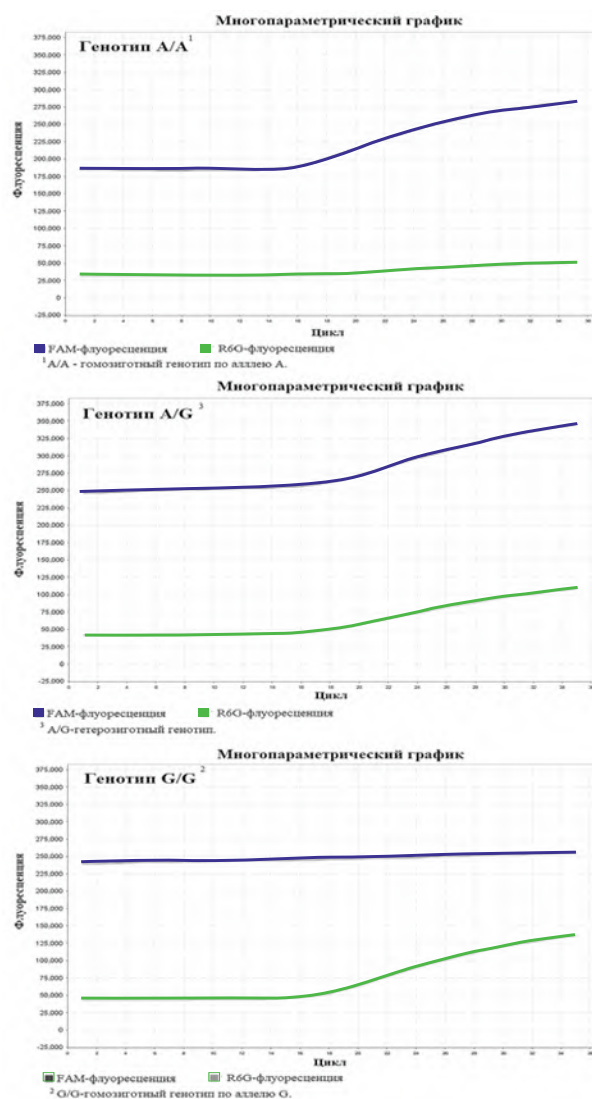
Анализ проведенного масштабного популяционного скрининга 958 особей домашних и диких северных оленей с использованием разработанной qPCR-системы выявил полиморфизм по SNP g. 1132348 гена *MSTN*, что подтверждается четкой дифференциацией аллелей: аллель А — интенсивный сигнал FAM-флуоресценции и аллель G — выраженный сигнал R6G-флуоресценции соответственно (рис. 1).

Рис. 1. Многопараметрические графики вариантов генотипов SNP (g. 1132348) гена миостатина пород и популяций северного оленя: 1 — А/А-гомозиготный генотип по аллелю А; 2 — G/G-гомозиготный генотип по аллелю G; 3 — А/G-гетерозиготный генотип

Fig. 1. Multivariate plots of SNP (g. 1132348) genotype variants of the myostatin gene in reindeer breeds and populations: 1 — A/A-homozygous genotype for the A allele; 2 — G/G-homozygous genotype for the G allele; 3 — A/G-heterozygous genotype

Примечание: аллелю А соответствует увеличение флуоресценции по каналу красителя FAM, аллелю G соответствует увеличение флуоресценции по каналу красителя R6G.

Note: the A allele corresponds to an increase in fluorescence in the FAM dye channel, the G allele corresponds to an increase in fluorescence in the R6G dye channel.



¹ Меркурьева Е.К. Биометрия в животноводстве. М.: Колос. 1977; 311.

На основании проведенного генотипирования всех официально зарегистрированных четырех пород, тувинской и монгольской популяций домашнего северного оленя, а также тундровой и таежной группировок дикого северного оленя были рассчитаны частоты встречаемости генотипов и аллелей SNP g. 1132348 гена *MSTN* (табл. 1).

Сравнительный анализ распределения генотипов и аллелей SNP гена миостатина между домашними и дикими популяциями северного оленя показал, что наибольшие различия отмечены между дикими оленями тундровой (A = 67,8%) и домашними оленями монгольской (G = 65,4%) популяций. Как следствие, выборка дикой популяции в 2,6 раза превосходит домашних сородичей по частоте встречаемости гомозиготного генотипа AA: 46,1% против 17,95% соответственно.

Вместе с тем обратная закономерность между популяциями отмечена в отношении распределения гомозиготного генотипа GG: 25,62% — у домашних северных оленей, 9,74% — у диких. Сохранение высоких частот аллеля A у диких популяций может отражать как его адаптивную ценность в естественных условиях, так и стабилизирующий отбор. В свою очередь, разнообразие аллельных профилей у домашних оленей может свидетельствовать о региональных особенностях селекции и различных стратегиях доместики.

Кроме этого, анализ данных таблицы 1, выявил значимые межпопуляционные различия в распределении аллелей среди пород и популяций домашних северных оленей. Так, ненецкая и эвенкийская породы характеризовались преобладанием аллеля A (59,8% и 60,2% соответственно) с высокой частотой гетерозиготного генотипа AG (48,02% и 47,73%). В свою очередь, преобладание аллеля G отмечено у северных оленей эвенской, чукотской пород, а также монгольской популяции: 60,9%, 65,3% и 65,4% соответственно. При этом у эвенских и чукотских оленей наблюдается высокая доля гомозигот GG — 40,63% и 44,90% соответственно. Выборка тувинской популяции имела практически равное соотношение аллелей A (43,5%) и G (56,5%) с преобладанием гетерозиготного генотипа AG — 54,84%.

Что касается диких популяций северного оленя, то было выявлено, что во всей исследованной выборке дикого северного оленя наблюдается выраженное доминирование аллеля A: 67,8% — в тундровой и 71,1% — в таежной. В тундровой популяции детектировано преобладание гомозиготного генотипа AA (46,67%), в таежной — гетерозиготного генотипа AG (57,89%). При этом у таежных оленей гомозиготный генотип GG практически отсутствовал.

Выводы/Conclusions

Впервые представлен глубокий анализ полиморфизма гена миостатина у северного оленя, направленный на выявление аллельных вариантов SNP g. 1132348 гена миостатина, на основании

Таблица 1. Частота встречаемости генотипов и аллелей SNP гена *MSTN* на основе масштабного популяционно-го скрининга домашних и диких северных оленей

Table 1. Genotype and allele frequency distribution of *MSTN* gene SNP based on large-scale population screening of domestic and wild reindeer

Порода (популяция)	Коли- чество голов	Генотипы, %			Преобладаю- щий аллель, %
		AA	AG	GG	
Домашние северные олени					
Ненецкая	479	35,49	48,02	16,49	A (59,8)
Эвенская	64	18,75	40,63	40,63	G (60,9)
Эвенкийская	44	36,36	47,73	15,91	A (60,2)
Чукотская	147	14,29	40,82	44,90	G (65,3)
Тувинская	31	16,13	54,84	29,03	A (43,5)
Монгольская	39	17,95	33,33	48,72	G (65,4)
Всего	804	17,95	33,33	48,72	A (51,6)
Дикие северные олени					
Тундровая	135	46,67	42,22	11,11	A (67,8)
Таежная	19	42,11	57,89	0,00	A (71,1)
Всего	154	46,10	44,16	9,74	A (68,2)

которых дана оценка генетической дифференциации домашней и дикой форм северного оленя, представленных индивидуумами ненецкой, эвенской, эвенкийской и чукотской пород, а также тувинской и монгольской популяций домашних северных оленей и тундровой и таежной популяций дикого северного оленя.

Результаты исследования продемонстрировали эффективность применяемой тест-системы генотипирования SNP g. 1132348 гена *MSTN* для масштабных популяционных исследований, что открывает новые возможности для изучения генетического разнообразия северного оленя.

Выявленные закономерности распределения аллелей SNP g. 1132348 гена *MSTN* согласуются с ранее полученными данными с использованием других генетических маркеров, дополняя существование выраженной генетической дифференциации домашних и диких популяций северного оленя, что отражает различия эволюционной траектории их развития — исторически сложившиеся пути генетической адаптации, сформированные под влиянием естественного отбора у диких популяций и искусственного отбора у домашних форм. Для проверки данного предположения и установления функционального значения выявленного полиморфизма, его связи с хозяйственно ценными признаками необходимы дальнейшие исследования, включающие ассоциативный анализ и изучение экспрессии гена, а также поиска других потенциальных генов-кандидатов процессов адаптации и доместики вида.

Полученные результаты вносят дополнительный вклад в исследования генетического разнообразия популяций северных оленей (*Rangifer tarandus*) и имеют прикладное значение как для селекционно-племенной работы, так и для разработки научно обоснованных программ сохранения генетических ресурсов вида.

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FGGN-2024-0018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Pelletier M., Kotiaho A., Niinimäki S., Salmi A.-K. Identifying early stages of reindeer domestication in the archaeological record: a 3D morphological investigation on forelimb bones of modern populations from Fennoscandia. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2020; 12(8): 169. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01123-0>
- Николаев С.В., Матюков В.С., Филатов А.В. Внутрипопуляционная генетическая дифференциация стада северных оленей Ямальной опытной станции. *Аграрная наука*. 2024; (11): 82–86. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-82-86>
- Pelletier M., Discamps E., Bignon-Lau O., Salmi A.-K. Investigating the domestication and early management of reindeer (*Rangifer tarandus*) in the Sámi archaeological context from teeth geometric morphometrics. *Scientific Reports*. 2023; 13: 6174. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33422-6>
- Murashkin A.I., Kolpakov E.M., Shumkin V.Ya., Khartanovich V.I., Moiseyev V.G. Kola Oleneostrovskiy Grave Field: A Unique Burial Site in the European Arctic. *Iskos*. 2016; 21: 185–199. <https://www.elibrary.ru/vulhyv>
- Losey R.J. et al. Domestication as Enskilment: Harnessing Reindeer in Arctic Siberia. *Journal of Archaeological Method and Theory*. 2021; 28(1): 197–231. <https://doi.org/10.1007/s10816-020-09455-w>
- Кошкина О.А., Соловьева А.Д., Денискова Т.Е., Харзинова В.Р., Зиновьева Н.А. Изучение генетического разнообразия домашних и диких популяций северного оленя (*Rangifer tarandus* L., 1758) с использованием маркеров ядерного и митохондриального геномов. *Сельскохозяйственная биология*. 2022; 57(6): 1101–1116. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1101rus>
- Kharzinova V.R. et al. Genetic diversity and population structure of domestic and wild reindeer (*Rangifer tarandus* L. 1758): A novel approach using BovineHD BeadChip. *PLOS One*. 2018; 13(11): e0207944. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207944>
- Svishcheva G.R., Babayan O.V., Sipko T.P., Kashtanov S.N., Kholodova M.V., Stolpovsky Y.A. Genetic differentiation between coexisting wild and domestic Reindeer (*Rangifer tarandus* L. 1758) in Northern Eurasia. *Genetic Resources*. 2022; 3(6): 1–14. <https://doi.org/10.46265/genresj.UYML5006>
- Zhai J.-C., Liu W.-S., Yin Y.-J., Xia Y.-L., Li H.-P. Analysis on Genetic Diversity of Reindeer (*Rangifer tarandus*) in the Greater Khingan Mountains Using Microsatellite Markers. *Zoological Studies*. 2017; 56: 11. <https://doi.org/10.6620/ZS.2017.56-11>
- Jepsen B.I., Siegismund H.R., Fredholm M. Population genetics of the native caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) and the semi-domestic reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in Southwestern Greenland: evidence of introgression. *Conservation Genetics*. 2002; 3(4): 401–409. <https://doi.org/10.1023/A:1020523303815>
- Столповский Ю.А. и др. Генетическая оценка пород северного оленя (*Rangifer tarandus*) и их дикого предка с помощью новой панели STR-маркеров. *Генетика*. 2020; 56(12): 1410–1426. <https://doi.org/10.31857/S0016675820120139>
- Харзинова В.Р. и др. Изучение аллелофонда и степени генетической интрогрессии домашней и дикой популяций северного оленя (*Rangifer tarandus* L., 1758) с использованием микросателлитов. *Сельскохозяйственная биология*. 2016; 51(6): 811–823. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.6.811rus>
- Miller J.H., Druckenmiller P., Bahn V. Antlers on the Arctic Refuge: capturing multi-generational patterns of calving ground use from bones on the landscape. *Proceedings. Biological Sciences*. 2013; 280(1759): 20130275. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0275>
- McPherron A.C., Lawler A.M., Lee S.-J. Regulation of skeletal muscle mass in mice by a new TGF-beta superfamily member. *Nature*. 1997; 387(6628): 83–90. <https://doi.org/10.1038/387083a0>
- Gonzalez-Cadavid N.F. et al. Organization of the human myostatin gene and expression in healthy men and HIV-infected men with muscle wasting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1998; 95(25): 14938–14943. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.25.14938>

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 study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FGGN-2024-0018).

REFERENCES

- Pelletier M., Kotiaho A., Niinimäki S., Salmi A.-K. Identifying early stages of reindeer domestication in the archaeological record: a 3D morphological investigation on forelimb bones of modern populations from Fennoscandia. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2020; 12(8): 169. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01123-0>
- Nikolaev S.V., Matyukov V.S., Filatov A.V. Intrapopulation genetic differentiation of reindeer herd of Yamal experimental station. *Agrarian science*. 2024; (11): 82–86 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-82-86>
- Pelletier M., Discamps E., Bignon-Lau O., Salmi A.-K. Investigating the domestication and early management of reindeer (*Rangifer tarandus*) in the Sámi archaeological context from teeth geometric morphometrics. *Scientific Reports*. 2023; 13: 6174. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33422-6>
- Murashkin A.I., Kolpakov E.M., Shumkin V.Ya., Khartanovich V.I., Moiseyev V.G. Kola Oleneostrovskiy Grave Field: A Unique Burial Site in the European Arctic. *Iskos*. 2016; 21: 185–199. <https://www.elibrary.ru/vulhyv>
- Losey R.J. et al. Domestication as Enskilment: Harnessing Reindeer in Arctic Siberia. *Journal of Archaeological Method and Theory*. 2021; 28(1): 197–231. <https://doi.org/10.1007/s10816-020-09455-w>
- Koshkina O.A., Solovyova A.D., Deniskova T.E., Kharzinova V.R., Zinovieva N.A. Study of the genetic diversity of domestic and wild reindeer (*Rangifer tarandus* L., 1758) populations using nuclear and mitochondrial genomic markers. *Agricultural Biology*. 2022; 57(6): 1101–1116. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1101eng>
- Kharzinova V.R. et al. Genetic diversity and population structure of domestic and wild reindeer (*Rangifer tarandus* L. 1758): A novel approach using BovineHD BeadChip. *PLOS One*. 2018; 13(11): e0207944. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207944>
- Svishcheva G.R., Babayan O.V., Sipko T.P., Kashtanov S.N., Kholodova M.V., Stolpovsky Y.A. Genetic differentiation between coexisting wild and domestic Reindeer (*Rangifer tarandus* L. 1758) in Northern Eurasia. *Genetic Resources*. 2022; 3(6): 1–14. <https://doi.org/10.46265/genresj.UYML5006>
- Zhai J.-C., Liu W.-S., Yin Y.-J., Xia Y.-L., Li H.-P. Analysis on Genetic Diversity of Reindeer (*Rangifer tarandus*) in the Greater Khingan Mountains Using Microsatellite Markers. *Zoological Studies*. 2017; 56: 11. <https://doi.org/10.6620/ZS.2017.56-11>
- Jepsen B.I., Siegismund H.R., Fredholm M. Population genetics of the native caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) and the semi-domestic reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in Southwestern Greenland: evidence of introgression. *Conservation Genetics*. 2002; 3(4): 401–409. <https://doi.org/10.1023/A:1020523303815>
- Stolpovsky Yu.A. et al. Genetic Evaluation of the Breeds of Reindeer (*Rangifer tarandus*) and Their Wild Ancestor Using a New Panel of STR Markers. *Russian Journal of Genetics*. 2020; 56(12): 1469–1483. <https://doi.org/10.1134/S1022795420120133>
- Kharzinova V.R. et al. Study of the allele pool and the degree of genetic introgression of semi-domesticated and wild populations of reindeer (*Rangifer tarandus* L., 1758) using microsatellites. *Agricultural Biology*. 2016; 51(6): 811–823. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.6.811eng>
- Miller J.H., Druckenmiller P., Bahn V. Antlers on the Arctic Refuge: capturing multi-generational patterns of calving ground use from bones on the landscape. *Proceedings. Biological Sciences*. 2013; 280(1759): 20130275. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0275>
- McPherron A.C., Lawler A.M., Lee S.-J. Regulation of skeletal muscle mass in mice by a new TGF-beta superfamily member. *Nature*. 1997; 387(6628): 83–90. <https://doi.org/10.1038/387083a0>
- Gonzalez-Cadavid N.F. et al. Organization of the human myostatin gene and expression in healthy men and HIV-infected men with muscle wasting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1998; 95(25): 14938–14943. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.25.14938>

16. Joulia-Ekaza D., Cabello G. Myostatin regulation of muscle development: Molecular basis, natural mutations, physiopathological aspects. *Experimental Cell Research*. 2006; 312(13): 2401–2414. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2006.04.012>

17. Jeanplong F., Sharma M., Somers W.G., Bass J.J., Kambadur R. Genomic organization and neonatal expression of the bovine myostatin gene. *Molecular and Cellular Biochemistry*. 2001; 220(1–2): 31–37. <https://doi.org/10.1023/a:1010801511963>

18. Du R. *et al.* Cloning and sequence analysis of myostatin promoter in sheep. *DNA Sequence*. 2005; 16(6): 412–417. <https://doi.org/10.1080/10425170500226474>

19. Stinckens A. *et al.* Characterization of the complete porcine *MSTN* gene and expression levels in pig breeds differing in muscularity. *Animal Genetics*. 2008; 39(6): 586–596. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2008.01774.x>

20. Dall'Olio S., Fontanesi L., Nanni Costa L., Tassinari M., Minieri L., Falaschini A. Analysis of horse myostatin gene and identification of single nucleotide polymorphisms in breeds of different morphological types. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. 2010; 2010: 542945. <https://doi.org/10.1155/2010/542945>

16. Joulia-Ekaza D., Cabello G. Myostatin regulation of muscle development: Molecular basis, natural mutations, physiopathological aspects. *Experimental Cell Research*. 2006; 312(13): 2401–2414. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2006.04.012>

17. Jeanplong F., Sharma M., Somers W.G., Bass J.J., Kambadur R. Genomic organization and neonatal expression of the bovine myostatin gene. *Molecular and Cellular Biochemistry*. 2001; 220(1–2): 31–37. <https://doi.org/10.1023/a:1010801511963>

18. Du R. *et al.* Cloning and sequence analysis of myostatin promoter in sheep. *DNA Sequence*. 2005; 16(6): 412–417. <https://doi.org/10.1080/10425170500226474>

19. Stinckens A. *et al.* Characterization of the complete porcine *MSTN* gene and expression levels in pig breeds differing in muscularity. *Animal Genetics*. 2008; 39(6): 586–596. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2008.01774.x>

20. Dall'Olio S., Fontanesi L., Nanni Costa L., Tassinari M., Minieri L., Falaschini A. Analysis of horse myostatin gene and identification of single nucleotide polymorphisms in breeds of different morphological types. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. 2010; 2010: 542945. <https://doi.org/10.1155/2010/542945>

ОБ АВТОРАХ

Вероника Руслановна Харзинова

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией ДНК-технологий в животноводстве

veronika0784@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8067-0404>

Надежда Александровна Чурбакова

аспирант, младший научный сотрудник

nadushik95@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-1061-2715>

Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, г. о. Подольск, Московская обл., 142132, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Veronika Ruslanovna Kharzinova

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory of DNA technologies in animal husbandry

veronika0784@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8067-0404>

Nadezhda Aleksandrovna Churbakova

Graduate Student, Junior Research

nadushik95@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-1061-2715>

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, Russia

АГРАРНАЯ НАУКА

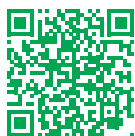
AGRARIAN SCIENCE

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



Научно-теоретический и производственный журнал «Аграрная наука» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (K1, K2), в список Russian Science Citation Index (RSCI), в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в ядро РИНЦ, «Белый список» ВАК РФ, в список периодических изданий Международной базы данных AGRIS (ГНУ ЦНСХБ Россельхозакадемии).

Ознакомиться с информацией о перечне специальностей ВАК и итоговом распределении журналов по категориям можно здесь:



Приравнивание научных журналов, входящих в наукометрические базы данных, к журналам Перечня ВАК с распределением по категориям:



Согласно приведенным данным, журнал «Аграрная наука» относится к категории K1.

Подобную информацию о журнале можно получить у научного редактора М.Н. Долгой
+7 (495) 777 67 67 (доб. 1453)
dolgaya@vicgroup.ru

Ш. Бахтыбеккызы ✉

А.С. Мусаева

З.С. Оразымбетова

Б.С. Арынгазиев

С.А. Алаева

А.К. Бекитаева

К.Б. Омашев

Е. Сагдат

Н.И. Малмаков

Институт генетики и физиологии,
Алматы, Казахстан

✉ sholpan_bsb@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.05.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Бахтыбеккызы Ш., Мусаева А.С.,
Оразымбетова З.С., Арынгазиев Б.С.,
Алаева С.А., Бекитаева А.К., Омашев К.Б.,
Сагдат Е., Малмаков Н.И.

Исследование полиморфизма генов *CAST* и *GH* у казахских курдючных грубошерстных овец

РЕЗЮМЕ

В работе представлены результаты молекулярно-генетического анализа полиморфизмов в локусах *GH-HaeIII* и *CAST-MspI* у казахских курдючных грубошерстных овец, разводимых в крестьянских хозяйствах «Разахун» Жамбылской области и «Токан» Жетысуской области.

Цели исследования — изучение генетической структуры популяций и выявление особенностей распределения генотипов и аллелей, ассоциированных с продуктивными признаками.

Генотипирование проводило методом ПЦР с последующим рестрикционным анализом (ПЦР-ПДРФ). Установлено, что локус *GH-HaeIII* характеризуется крайне низким уровнем полиморфизма: аллель А оказался почти полностью фиксирован во всех изученных группах, в то время как локус *CAST-MspI* продемонстрировал более высокую степень аллельного разнообразия, особенно в популяции хозяйства «Разахун». Выявлены статистически значимые различия в распределении генотипов, показатели гетерозиготности, коэффициенты фиксации и отклонения от равновесия Харди — Вайнберга. Полученные результаты подчеркивают ценность локуса *CAST* в качестве информативного маркера для оценки генетического разнообразия и планирования селекционной работы. Данные исследования могут служить основой для дальнейшего внедрения генетических маркеров в программы племенного разведения овец в Казахстане.

Ключевые слова: полиморфизм, ген, *CAST*, *GH*, генотип, ПЦР-ПДРФ, аллели, генотипирование, продуктивность, казахские курдючные грубошерстные овцы

Для цитирования: Бахтыбеккызы Ш. и др. Исследование полиморфизма генов *CAST* и *GH* у казахских курдючных грубошерстных овец. *Аграрная наука*. 2025; 400 (11): 60–67. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-60-67>

Sholpan Bakhtybekkyzy ✉

Aizhan S. Mussayeva

Zarina S. Orazymbetova

Berik S. Aryngazyev

Sabina A. Alayeva

Aidana K. Bekitayeva

Kairly B. Omashev

Elbolsyn Sagdat

Nurlan I. Malmakov

Institute of Genetics and Physiology,
Almaty, Kazakhstan

✉ sholpan_bsb@mail.ru

Received by the editorial office: 21.05.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Bakhtybekkyzy Sh., Mussayeva A.S.,
Orazymbetova Z.S., Aryngazyev B.S.,
Alayeva S.A., Bekitayeva A.K., Omashev K.B.,
Sagdat E., Malmakov N.I.

Study of *CAST* and *GH* gene polymorphisms in kazakh fat-tailed sheep

ABSTRACT

The paper presents the results of a molecular genetic analysis of polymorphisms at the *GH-HaeIII* and *CAST-MspI* loci in Kazakh black-tailed rough-haired sheep bred in farms “Razakhun” in Zhambyl region and “Tokan” in Zhetysu region.

The purpose of the study is to study the genetic structure of populations and identify the distribution of genotypes and alleles associated with productive traits.

Genotyping was performed by PCR followed by restriction analysis (PCR-RDF). It was found that the *GH-HaeIII* locus is characterized by an extremely low level of polymorphism: the A allele was almost completely fixed in all the studied groups, while the *CAST-MspI* locus demonstrated a higher degree of allelic diversity, especially in the “Razakhun” farm population.

Statistically significant differences in genotype distributions, heterozygosity indices, fixation coefficients, and deviations from Hardy — Weinberg equilibrium were observed. The findings highlight the value of the *CAST* locus as an informative marker for assessing genetic diversity and supporting breeding program design. These results may serve as a basis for the further implementation of genetic markers in selective breeding programs for sheep in Kazakhstan.

Key words: polymorphism, gene, *CAST*, *GH*, genotype, PCR-RFLP, alleles, genotyping, productivity, Kazakh fat-tailed coarse-wooled sheep

For citation: Bakhtybekkyzy Sh. et al. Study of *CAST* and *GH* gene polymorphisms in kazakh fat-tailed sheep. *Agrarian science*. 2025; 400 (11): 60–67 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-60-67>

¹ Согласно ГОСТ 31777-2012 Овцы и козы для убоя. Баранина, ягнятина и козлятина в тушах

Введение/Introduction

Создание стратегий для оптимального использования генофонда овец, разводимых в Казахстане, направлено на повышение мясной и шерстной продуктивности. Важными аспектами этого процесса являются разработка методов снижения кормовых затрат на единицу продукции, генетический мониторинг и контроль селекционных процессов, а также поиск дополнительных резервов для улучшения экономических показателей отрасли [1–5]. Эти задачи представляют собой ключевые приоритеты современного овцеводства [6–10].

Одной из приоритетных задач современного овцеводства является реализация генетического потенциала продуктивности и племенной ценности животных с использованием методов биохимического и молекулярно-генетического анализа [11–14].

Особое внимание уделяется изучению генов-кандидатов, кодирующих белки, играющие важную роль в регуляции роста, развития и обмена веществ. Среди них важное место занимают гены *GH* (гормона роста) и *CAST* (кальпастатина).

Ген *GH* (Growth Hormone — гормон роста) кодирует соматотропин — гормон, критически важный для роста, развития тканей и метаболизма. Полиморфизмы в этом гене могут оказывать влияние на уровень гормона и, как следствие, продуктивные показатели животных.

Ген *CAST* (Calpastatin) отвечает за синтез кальпастатина — ингибитора кальпаинов, Ca^{2+} -зависимых протеиназ, участвующих в процессе тендеризации мышечных волокон после убоя. Полиморфизмы в гене *CAST* связаны с ростом мышечной массы, качеством, в том числе «нежностью» мяса и живой массой животных.

Исследования показывают, что полиморфизмы генов *GH* и *CAST* могут быть полезны как молекулярные маркеры для отбора животных с высокими продуктивными качествами. Так, у овец породы советский меринос наиболее распространён аллель С гена *GH* (70,0%), тогда как аллель Т встречается реже (30,0%), при этом гомозиготы СС составляли 53,3%, гетерозиготы СТ — 33,3%, а ТТ — 13,4% [15].

Ген *CAST* демонстрирует связь с признаками продуктивности. Например, бараны польской равнинной породы с генотипом АА имели более благоприятный состав тканей задней конечности — высокое содержание мышц при низком содержании жира [16].

Для нормального формирования мышечной массы в мышцах необходима активность кальпастатина. В то же время после убоя низкая активность кальпастатина может способствовать получению постного и высококачественного мяса [17]. Выявлена статистически значимая связь у мясошерстных овец породы колумбия ($p < 0,05$) между полиморфизмом *CAST* (М/Н) и живой массой при рождении, ген *CAST* достоверно влиял на данный показатель. Эти результаты могут быть

использованы для выявления особей с благоприятными генотипами для реализации метода селекции с помощью маркеров [18].

Результаты генотипирования овец дагестанской горной породы показали, что полиморфизм гена *CAST* представлен с высокой частотой аллеля М (97%) и крайне низкой частотой аллеля N (3%). Это отразилось в генотипическом распределении: гомозиготный генотип ММ встречался в 93,0% случаев, гетерозиготный MN — в 7,0%, а генотип NN не был выявлен. Характерной особенностью данной популяции стало полное отсутствие полиморфизма в локусе гена *GH* — был обнаружен только один аллель А, встречающийся с частотой 100%, тогда как аллель В не выявлен. Таким образом, *GH*-локус оказался мономорфным в пределах исследуемой группы животных [19].

Л.Н. Чижова и Е.С. Суржикова [20] установили, что сравнительный анализ показателей роста и развития ягнят выявил преимущество носителей гомозиготных генотипов ВВ гена *GH* и NN гена *CAST*: их живая масса и среднесуточные приросты в возрасте 4 месяцев превышали аналогичные показатели у сверстников с генотипами АА гена *GH* и ММ гена *CAST* на 5,8 % и 6,1%, а также на 5,4% и 5,9% соответственно.

Гормон роста является ключевым анаболическим гормоном, вырабатываемым передней долей гипофиза у различных видов позвоночных и кодируемым геном, расположенным на 11-й хромосоме овец [21]. Он играет центральную роль в регуляции множества биологических процессов, включая постнатальный рост, развитие тканей и общий обмен веществ. Данный гормон способствует формированию скелетных структур, мышечной массы и внутренних органов, а также оказывает влияние на белковый и липидный обмен. В связи с этим у различных видов домашнего скота гормон роста имеет решающее значение для улучшения показателей роста, репродуктивной эффективности и лактации [22, 23]. Это делает его важным объектом исследований, направленных на оптимизацию продуктивных качеств животных [24, 25].

Результаты исследований выявили связь между локусом гена *GH*, массой тела и длиной хвоста у овец породы Авасси [26]. В другом исследовании, проведенном на овцах породы тексель, был обнаружен однонуклеотидный полиморфизм (SNP) в положении с. 573 G > A; при этом соблюдалось равновесие Харди — Вайнберга. Частоты генотипов АА, АG и GГ составили 0,24, 0,55 и 0,21 соответственно, а частоты аллелей А и G — 0,51 и 0,49. Установлена статистически значимая связь между генетическим разнообразием гена *GH* и признаками роста: наибольшие значения массы тела, обхвата груди и длины туловища были зафиксированы у особей с генотипом АА (33,98 кг) ($p < 0,01$) [27–29].

Таким образом, гормон роста и кальпастатин играют ключевую роль в формировании

хозяйственно полезных признаков, и их полиморфизм представляет особый интерес для селекционно-генетических программ в овцеводстве.

Цели данной работы — изучение аллельного и генотипического разнообразия локусов *GH* и *CAST* у казахских курдючных грубошерстных овец, а также выявление особенностей их распределения в популяциях, разводимых в Жамбылской и Жетысуской областях Казахстана.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Молекулярно-генетические исследования проводили в лаборатории генетики и цитогенетики животных РГП на ПХВ «Институт генетики и физиологии» (Казахстан).

Все экспериментальные процедуры с участием животных были рассмотрены и одобрены Локальной этической комиссией Института генетики и физиологии КН МНВО Республики Казахстан (протокол от 3 ноября 2022 года № 6, г. Алматы, Казахстан).

В исследование включены 357 овец казахской курдючной породы, из которых 177 голов происходили из КХ «Разахун» (Жамбылская обл.) и 180 — из КХ «Токан» (Жетысуская обл.).

В качестве биологического материала использовали образцы венозной крови овец. Отбор крови проводили из яремной вены, расположенной в верхней трети шеи, в утренние часы до кормления. Для этого применяли вакуумную систему S-Monovette с антикоагулянтом (K2 ЭДТА) и стерильную иглу. Отбирали по 3–4 мл крови с соблюдением ветеринарно-санитарных норм. Каждая пробирка была индивидуально промаркирована в соответствии с номером животного.

Образцы крови хранили при температуре -20 °C до момента выделения ДНК. Экстракцию геномной ДНК проводили с использованием коммерческого набора Thermo Scientific GeneJET Genomic DNA Purification Kit (Thermo Fisher Scientific, США) согласно протоколу производителя, включающему этап мембранной очистки. Качество и концентрацию выделенной ДНК оценивали с помощью спектрофотометра NanoDrop (Thermo Fisher Scientific), а также подтверждали методом электрофореза в агарозном геле.

Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) и рестрикционный анализ проводили в соответствии с методиками, описанными Palmer *et al.* (1998) для гена *CAST* и Hua *et al.* (2009) для гена *GH* (табл. 1).

После рестрикционного расщепления фрагменты ДНК, соответствующие различным аллелям, визуализировали в ультрафиолетовом свете после электрофореза в 2%-ном и 2,5%-ном агарозных

Таблица 1. Используемые праймеры и рестрикционные ферменты
Table 1. Primers and restriction enzymes used

Гены	Праймеры (5'→3')	Рестриктазы	Литература
<i>CAST</i>	F-TGGGGCCCAATGACGCCATCGATG R-GGTGGAGCACTTCTGATCACC	<i>MspI</i>	Palmer <i>et al.</i> , 1998
<i>GH</i>	F-GGAGGCAGGAAGGGATGAA R-CCAAGGGAGGGAGAGACAGA	<i>HaeIII</i>	Hua <i>et al.</i> , 2009

гелях. Гели окрашивали красителем GelRed (разведение 1:10000 в воде) в буфере 1× TBE.

Анализ распределения генотипов, расчет аллельных частот и популяционно-генетических параметров (*He*, *I*, *Fis*), а также проверку соответствия закону Харди — Вайнберга (χ^2 -тест) проводили с использованием программного пакета GenAlEx 6.5¹ (Peakall и Smouse, 2006; 2012).

Первичную обработку таблиц частот и визуализацию распределения аллелей выполняли в Microsoft Excel 2019 (США).

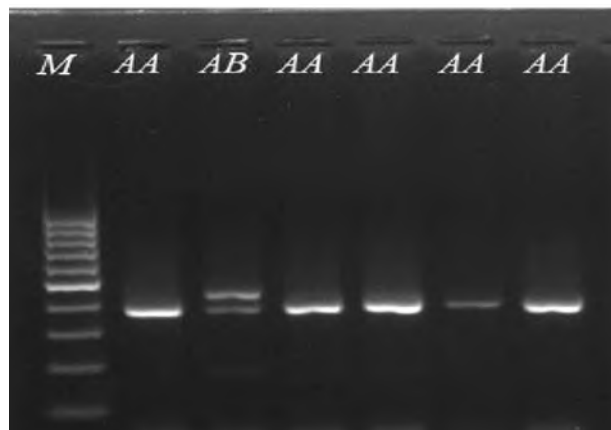
Анализ кодоминантных маркеров осуществляли на основе полученных генотипических данных.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На основании молекулярно-генетического анализа, проведенного методом ПЦР-ПДРФ с использованием рестриктаз *HaeIII* для гена *GH* и *MspI*, для гена *CAST*, были определены генотипы овец казахской курдючной породы из двух хозяйств — КХ «Разахун» и КХ «Токан». Разделение фрагментов осуществляли методом электрофореза в 2%-ном агарозном геле, что позволило достоверно идентифицировать генотипы по характерному профилю полос (рис. 1, 2).

Рис. 1. Электрофореграмма продуктов ПЦР-ПДРФ по локусу *GH* после рестрикции ферментом *HaeIII* на 2%-ном агарозном геле. Обозначения: М — ДНК-маркер 100 bp (GeneRuler, Thermo Scientific); генотип AA — 366 п. н., 56 п. н.; генотип AB — 422 п. н., 366 п. н. и 56 п. н.

Fig. 1. Electropherogram of PCR-RFLP products at the *GH* locus after restriction with *HaeIII* enzyme on a 2% agarose gel. Legend: M — 100 bp DNA marker (GeneRuler, Thermo Scientific); genotype AA — 366 bp, 56 bp; genotype AB — 422 bp, 366 bp, and 56 bp



¹ <https://nexusacademy.ru/genalex>

В локусе *GH* после рестрикционного расщепления были выявлены два генотипа — AA и AB. Генотип AA характеризовался наличием двух фрагментов длиной 366 п. н. и 56 п. н., а AB — тремя фрагментами: 422 п. н., 366 п. н. и 56 п. н. Генотип BB не был обнаружен ни в одном из исследуемых образцов (рис. 1), что согласуется с работами Ниа *et al.* (2009), где также сообщалось о редкости данного генотипа у мясных пород овец и может свидетельствовать о преобладании аллеля A в исследуемых популяциях казахских курдючных овец.

Для локуса *CAST* после рестрикции *MspI* были выявлены все три возможных генотипа. Генотип MM представлен двумя фрагментами — 336 п. н. и 286 п. н., генотип NN — несрезанным фрагментом 622 п. н., а гетерозиготный MN включал все три фрагмента: 622 п. н., 336 п. н. и 286 п. н. (рис. 2). Наличие всех трех генотипов указывает на полиморфный характер данного локуса и позволяет использовать его в качестве генетического маркера при отборе животных по мясной продуктивности.

Анализ распределения генотипов по локусам *GH-HaeIII* и *CAST-MspI* в зависимости от хозяйства и половозрастной группы выявил ряд особенностей, характеризующих генетическую структуру исследуемых популяций казахских курдючных овец (табл. 2).

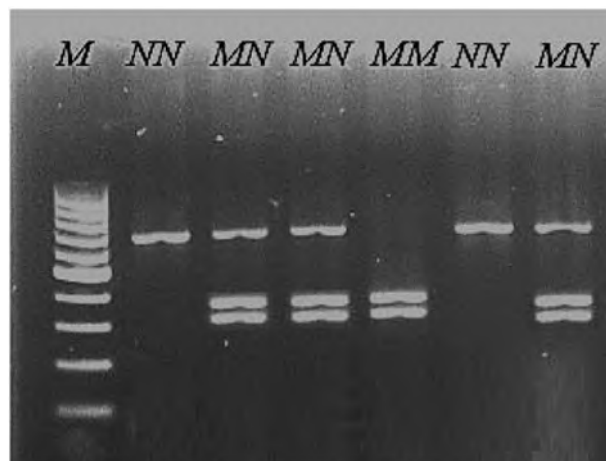
Для локуса *GH-HaeIII* во всех подгруппах наблюдалась почти полная фиксация гомозиготного генотипа AA, доля которого варьировала от 94,7 до 96,3%. Генотип AB выявлен лишь у 3,7–5,3% животных, а генотип BB отсутствовал полностью, что подтверждает крайне низкий уровень полиморфизма данного локуса. Такая однородность может быть следствием отбора, направленного на один из аллелей, или ограниченного генетического фонда исходной популяции.

По сравнению с *GH-HaeIII* локус *CAST-MspI* демонстрирует более высокую степень генотипического разнообразия. В обоих хозяйствах преобладал генотип MM — от 73,7% (ярки, КХ «Раззахун») до 93,8% (ярки, КХ «Токан»). Генотип MN был представлен во всех группах, особенно часто у ярок из КХ «Раззахун» (18,4%) и овцематок из КХ «Токан» (14,0%).

Генотип NN встречался только в КХ «Раззахун» и исключительно у молодняка (7,9%) и овцематок

Рис. 2. Электрофореграмма продуктов ПЦР-ПДРФ по локусу *CAST* после рестрикции ферментом *MspI* на 2%-ном агарозном геле. Обозначения: M — ДНК-маркер 100 бп (GeneRuler, Thermo Scientific); генотип MM — 336 п. н., 286 п. н.; генотип MN — 622 п. н., 336 п. н., 286 п. н.; генотип NN — 622 п. н.

Fig. 2. Electropherogram of PCR-RFLP products at the *CAST* locus after restriction with *MspI* enzyme on a 2% agarose gel. Legend: M — 100 bp DNA marker (GeneRuler, Thermo Scientific); genotype MM — 336 bp, 286 bp; genotype MN — 622 bp, 336 bp, 286 bp; genotype NN — 622 bp



(2,0%), в КХ «Токан» он не регистрировался. Отсутствие генотипа NN в КХ «Токан» и его низкая частота в КХ «Раззахун» могут свидетельствовать о слабом распространении аллеля N, что, вероятно, связано с селекционным вытеснением этого аллеля из популяции.

Таким образом, наблюдаемые различия в распределении генотипов указывают на более высокую степень полиморфизма локуса *CAST-MspI* по сравнению с *GH-HaeIII*, а также на возможное влияние селекционной практики, отбора или демографической структуры на генетическое разнообразие. Популяция КХ «Раззахун» характеризуется более равномерным распределением генотипов по локусу *CAST*, что потенциально делает ее более перспективной для дальнейших ассоциативных исследований.

Анализ аллельных частот и популяционно-генетических параметров (табл. 3) позволил более детально охарактеризовать генетическое разнообразие популяций.

Для локуса *GH-HaeIII* в обеих группах зарегистрировано преобладание аллеля A, частота

Таблица 2. Частота встречаемости генотипов генов *GH* и *CAST*

Table 2. Genotype frequencies of *GH* and *CAST* genes

Хозяйство	Половозрастная группа	Всего голов, n	GH				CAST					
			AA		AB		MM		MN		NN	
			n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
КХ «Раззахун»	Овцематки	100	95	95,0	5	5,0	87	87,0	11	11,0	2	2,0
	Ярки 6 мес.	77	72	94,7	4	5,3	56	73,7	14	18,4	6	7,9
КХ «Токан»	Овцематки	100	96	96,0	4	4,0	86	86,0	14	14,0	0	0,0
	Ярки 6 мес.	80	77	96,3	3	3,7	75	93,8	5	6,3	0	0,0

Таблица 3. Генетические параметры двух популяций овец

Table 3. Genetic parameters of two sheep populations

Локус	Аллели	КХ «Разахун» N = 177					КХ «Токан» N = 180				
		FRQ	χ^2	He	I	Fis	FRQ	χ^2	He	I	Fis
GH <i>HaeIII</i>	A	0,975	0,120 ^{ns}	0,050	0,118	-0,026	0,981	0,071 ^{ns}	0,038	0,096	-0,020
	B	0,025					0,019				
CAST- <i>MspI</i>	M	0,881	15,678***	0,209	0,364	0,298	0,947	0,559 ^{ns}	0,100	0,207	-0,056
	N	0,119					0,053				

Примечание: N — количество животных; FRQ — частота встречаемости аллелей; χ^2 — значение критерия Хи-квадрат для оценки соответствия распределения генотипов закону Харди — Вайнберга (ns — отличие статистически незначимо; *** $p < 0,001$); He — ожидаемая гетерозиготность; I — информационный индекс Шеннона; Fis — индекс фиксации.

которого составила 0,975 в КХ «Разахун» и 0,981 в КХ «Токан». Аллель В встречался крайне редко. Распределение генотипов соответствовало закону Харди — Вайнберга ($\chi^2 = 0,120$ и 0,071; $p > 0,05$). Низкие значения ожидаемой гетерозиготности (He) и индекса Шеннона (I) отражают практически мономорфное состояние локуса. Отрицательные значения коэффициента инбридинга (Fis) свидетельствуют о незначительном избытке гетерозигот, однако это не имеет существенного биологического значения.

Локус *CAST-MspI* продемонстрировал более выраженное полиморфное состояние, особенно в популяции КХ «Разахун». Частоты аллелей М и N составили 0,881 и 0,119 соответственно. При этом выявлено статистически значимое отклонение от равновесия Харди — Вайнберга ($\chi^2 = 15,678$; $p < 0,001$), сопровождаемое положительным значением Fis (0,298), что может указывать на дефицит гетерозигот, связанный с инбридингом, селекционным давлением или структурированием популяции. В КХ «Токан» частота аллеля М была выше (0,947), а частота N — ниже (0,053), при этом распределение генотипов соответствовало HWE ($\chi^2 = 0,559$; $p > 0,05$). Значение Fis было отрицательным (-0,056), что указывает на небольшой избыток гетерозигот.

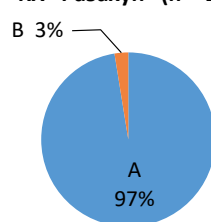
На рисунке 3 представлено процентное распределение аллелей в локусах GH и CAST у двух популяций овец. Данные представлены по результатам анализа кодоминантных маркеров.

Диаграммы 1 и 3 отображают распределение аллелей в локусе GH, где преобладает аллель А (97% и 98% соответственно), а аллель В встречается значительно реже (3% и 2%). Диаграммы 2 и 4 иллюстрируют частоты аллелей в локусе CAST: у животных из КХ «Разахун» аллель М составляет 88%, а аллель N — 12%; в КХ «Токан» доля аллеля М выше — 98%, а аллеля N — лишь 2%. Видимые различия в частотах указывают на возможные

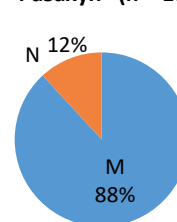
Рис. 3. Частоты аллелей в локусах GH и CAST у двух популяций овец: 1, 3 — распределение аллелей в локусе GH; 2, 4 — распределение аллелей в локусе CAST

Fig. 3. Allele frequencies at the GH and CAST loci in two sheep populations: 1, 3 — allele distribution at the GH locus; 2, 4 — allele distribution at the CAST locus

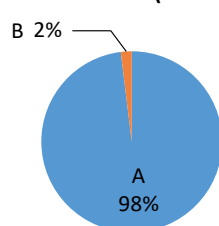
1. Частота аллелей в локусе GH КХ «Разахун» (n = 177)



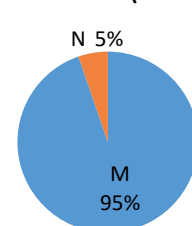
2. Частота аллелей в локусе CAST КХ «Разахун» (n = 177)



3. Частота аллелей в локусе GH КХ «Токан» (n = 180)



4. Частота аллелей в локусе CAST КХ «Токан» (n = 180)



особенности популяционной структуры и генетическое разнообразие между группами.

Выводы/Conclusions

Полученные данные по полиморфизму генов *GH-HaeIII* и *CAST-MspI* могут быть использованы для селекционного отбора и создания племенных групп с желательными генотипами в овцеводстве Казахстана. Преобладание аллелей А (GH) и М (CAST) наряду с выявленными значениями He, I и Fis отражает умеренный уровень генетического разнообразия и позволяет судить о различиях в селекционных подходах и исходной структуре популяций.

Локус *CAST-MspI* продемонстрировал более высокую информативность по сравнению с *GH-HaeIII* и может быть рекомендован в качестве молекулярно-генетического маркера в программах генетического мониторинга и отбора. Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями и подтверждают значение молекулярно-генетического анализа при оценке племенного материала.

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

Данное исследование финансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP19677706 «Полиморфизмы генов-кандидатов, влияющих на количество грудных и поясничных позвонков и мясную продуктивность овец»).

FUNDING

This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19677706 "Polymorphisms of candidate genes influencing quantity of thoracic and lumbar vertebrae and meat productivity in sheep").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никонова Е.А. и др. Эффективность выращивания чистопородных и помесных баранчиков. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2023. 4: 164–170. https://doi.org/10.52754/16948696_2023_4_24
2. Маликова М.Г., Сабитов М.Т., Тятигачев Ш.А., Искужина Р.С. Продуктивность ярок романовской породы при использовании в рационах комплексной минерально-витаминной добавки. *Аграрная наука*. 2024; (4): 65–69. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-381-4-65-69>
3. Косилов В.И., Никонова Е.А., Ребезов М.Б., Ахмедов Д.М. Влияние пола и физиологического состояния молодняка овец казахской курдючной грубошерстной породы на развитие опорно-двигательного аппарата в постнатальный период онтогенеза. *Состояние и перспективы совершенствования генетических и продуктивных особенностей овец курдючных пород. Материалы Международной научно-практической конференции*. Душанбе. 2021; 218–223. <https://elibrary.ru/rmetko>
4. Косилов В.И. и др. Влияние генотипа молодняка овец на баланс азота. *Аграрная наука*. 2025; (4): 81–87. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-81-87>
5. Юлдашбаев Ю.А. и др. Влияние генотипа баранчиков на минеральный обмен. *Овцы, козы, шерстяное дело*. 2024; (1): 15–18. <https://doi.org/10.26897/2074-0840-2024-1-15-18>
6. Омбаев А.М. Животноводство Казахстана: прошлое, настоящее и будущее. *Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ВИЖ им. Л.К.Эрнста*. Дубровицы. 2019; 352–362.
7. Абдурасулов А.Х., Каландаров М.А., Ребезов М.Б., Косилов В.И. Живая масса и особенности телосложения овец породы ала-тоо. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 71–80. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-71-80>
8. Лакота Е.А. Влияние возраста родителей на продуктивные качества потомства у овец. *Аграрная наука*. 2025; (7): 57–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-57-61>
9. 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 заслуженного работника Высшей школы РФ, почетного работника высшего профессионального образования РФ, почетного гражданина Брянской области д-ра биол. наук, профессора Е.П. Ващекина*. Брянск. 2022; 300–303. <https://elibrary.ru/fkpdfx>
10. Косилов В.И., Рахимжанова И.А., Ребезов М.Б., Губайдуллин Н.М., Валитов Ф.Р., Старцева Н.В. Показатели белкового и углеводного обмена крови чистопородных и помесных валушков по сезонам года. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025; 2(112): 197–201. <https://elibrary.ru/bqyovo>
11. Селионова М.И. Иммуногенетические маркеры в селекции овец. *Зоотехния*. 2004; (9): 12–14. <https://elibrary.ru/hrrxxr>
12. Преснякова Т.А., Хайнацкий В.Ю. Использование современных технологий для генетической экспертизы происхождения животных мясных пород. *Новые подходы в развитии животноводства на основе использования региональных породных ресурсов. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию со дня Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. и 110-й годовщине со дня рождения ветерана Великой отечественной войны д-ра с.-х. наук, профессора М.Б. Нармаева. Элиста: Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова*. 2025; 154–163. <https://elibrary.ru/klieok>

REFERENCES

1. Nikonova E.A. et al. Efficiency of growing purebred and crossbred rams. *Journal of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary and zootechnics*. 2023. 4: 164–170 (in Russian). https://doi.org/10.52754/16948696_2023_4_24
2. Malikova M.T., Sabitov M.T., Tyatigachev Sh.A., Iskuzhina R.S. Productivity of the ewe's lambs Romanov breed when using a complex of mineral and vitamin supplements in diets. *Agrarian science*. 2024; (4): 65–69 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-381-4-65-69>
3. Kosilov V.I., Nikonova E.A., Rebezov M.B., Akhmedov D.M. Influence of gender and physiological state young sheep of the kazakh short-tailed rough-haired sheep breeds for the development of the musculoskeletal system in postnatal period of ontogenesis. *Status and prospects for improving the genetic and productive characteristics of fat-tailed sheep. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Dushanbe, 2021; 218–223 (in Russian). <https://elibrary.ru/rmetko>
4. Kosilov V.I. et al. The effect of the genotype of young sheep on the nitrogen balance. *Agrarian science*. 2025; (4): 81–87 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-81-87>
5. Yuldashbaev Yu. A. et al. The influence of ram genotype on mineral metabolism. *Sheep, goats, and wool production*. 2024; (1): 15–18 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2074-0840-2024-1-15-18>
6. Ombaev A.M. Animal husbandry in Kazakhstan: past, present, and future. *Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Russian Research Institute of Animal Husbandry named L.K. Ernst*. Dubrovitsy. 2019; 352–362 (in Russian).
7. Abdurasulov A.Kh., Kalandarov M.A., Rebezov M.B., Kosilov V.I. Live weight and body features of Ala-Too sheep. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 71–80 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-71-80>
8. Lakota E.A. The influence of parental age on the productive qualities of offspring sheep. *Agrarian science*. 2025; (7): 57–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-57-61>
9. 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 the Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional education of the Russian Federation, honorary citizen of the Bryansk region, Doctor of Biology, Professor E.P. Vashchekin*. Bryansk. 2022; 300–303 (in Russian). <https://elibrary.ru/fkpdfx>
10. Kosilov V.I., Rakhimzhanova I.A., Rebezov M.B., Gubaydullin N.M., Valitov F.R., Startseva N.V. Protein and carbohydrate metabolism indices in the blood of purebred and crossbred wethers by seasons of the year. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025; 2(112): 197–201 (in Russian). <https://elibrary.ru/bqyovo>
11. Selionova M.I. Immunogenetic markers in sheep selection. *Zootekniya*. 2004; (9): 12–14 (in Russian). <https://elibrary.ru/hrrxxr>
12. Presnyakova T.A., Khainatsky V.Yu. Use of modern technologies for genetic examination of the origin of meat breeds of animals. *New approaches to the development of animal husbandry based on the use of regional breed resources. Materials of the All-Russian Scientific and Practical conference with international participation dedicated to the 80th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War of 1941–1945 and the 110th anniversary of the birth of the veteran of the Great Patriotic War, Doctor of Agricultural Sciences, Professor M.B. Narmaev*. Elista: B.B. Gorodovikov Kalmyk State University. 2025; 154–163 (in Russian). <https://elibrary.ru/klieok>

13. Племяшов К.В., Беликова А.О. Инновационные молекулярно-генетические технологии в животноводстве. Актуальные проблемы репродуктивного здоровья животных. *Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Вятского государственного агротехнологического университета и 95-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки Российской Федерации д-ра ветеринар. наук профессора А.И. Варганова*. Сыктывкар: Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр» Уральского отделения Российской академии наук. 2025; 317–322. <https://elibrary.ru/gjtnqc>
14. Хамируев Т.Н., Гончаренко Г.М., Хорошилова Т.С. Ассоциация полиморфизма генов GDF9/G1, CAST, KRT1.2, KAP1.3 с хозяйственно полезными признаками пород овец Забайкальского края. *Актуальные проблемы сельского хозяйства и перспективы развития. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 60-летию Научно-исследовательского института ветеринарии Восточной Сибири — филиала «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук» и 300-летию РАН*. Чита: Государственное учреждение дополнительного профессионального образования «Институт развития образования Забайкальского края». 2024; 137–144. <https://elibrary.ru/rmgwjg>
15. Селионова М.И., Ковалев Д.А., Скорых Л.Н., Сафонова Н.С., Ефимова Н.И. Исследование полиморфизма генов гормона роста, лептина у овец породы советский меринос. *Вестник АПК Ставрополя*. 2019; (3): 25–29. <https://elibrary.ru/rkalwl>
16. Greguła-Kania M., Gruszecki T.M., Junkuszew A., Juszcuk-Kubiak E., Florek M. Association of CAST gene polymorphism with carcass value and meat quality in two synthetic lines of sheep. *Meat Science*. 2019; 154: 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.04.007>
17. Скорых Л.Н., Суховеева А.В., Скокова А.В., Бобрышов С.С. Ассоциация однонуклеотидных полиморфизмов в генах GH, CAST с убойными качествами у овец породы маньчжурский меринос. *Животноводство и кормопроизводство*. 2023; 106(4): 57–67. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-57>
18. Valencia C.P.L., Franco L.Á.Á., Herrera, D.H. Association of single nucleotide polymorphisms in the CAPN, CAST, LEP, GH, and IGF-1 genes with growth parameters and ultrasound characteristics of the Longissimus dorsi muscle in Colombian hair sheep. *Tropical Animal Health and Production*. 2022; 54(1): 82. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03086-x>
19. Оздемиров А.А., Чижова Л.Н., Хожиков А.А., Суржикова Е.С., Догеев Г.Д., Абдулмагомедов С.Ш. Полиморфизм генов CAST, GH, GDF9 овец дагестанской горной породы. *Юг России: экология, развитие*. 2021; 16(2): 39–44. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-2-39-44>
20. Чижова Л.Н., Суржикова Е.С., Забелина М.В., Луцива Е.Д., Ефимова Н.И. Полиморфизм генов GH, CAST у овец в связи с показателями резистентности. *Аграрный научный журнал*. 2020; (12): 75–77. <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i12pp75-77>
21. Ayuk J., Sheppard M.C. Growth hormone and its disorders. *Postgraduate Medical Journal*. 2006; 82(963): 24–30. <https://doi.org/10.1136/pgmj.2005.036087>
22. Веремеенко О.С., Евлагина Д.Д., Суржикова Е.С., Михайленко Т.Н. Полиморфизм гена гормона роста (GH) у овец северокавказской мясо-шерстной породы. *Молодежная наука — развитию агропромышленного комплекса. Материалы V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Курск: Курский государственный аграрный университет им. И.И. Иванова. 2025; 270–275. <https://elibrary.ru/iuncdm>
23. Кошчаев А.Г., Святенко Т.С. Взаимосвязь результатов геномной оценки по показателям продуктивности голштинского скота и аллельных вариантов гена гормона роста GH1. *Современные достижения в генетике и селекции сельскохозяйственных животных. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию ФГБОУ ВО СПбГАУ*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. 2025; 26–29. <https://elibrary.ru/mlpofb>
24. Gorlov I.F. et al. Association of the growth hormone gene polymorphism with growth traits in Salsk sheep breed. *Small Ruminant Research*. 2017; 150: 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.02.019>
25. Singh P.P., Tomar S.S., Thakur M.S., Kumar A. Polymorphism and association of growth hormone gene with growth traits in Sirohi and Barbari breeds of goat. *Veterinary World*. 2015; 8(3): 382–387. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2015.382-387>
26. Bayraktar M., Shoshin O. Estimation of the associations between GH and DGAT1 genes and growth traits by using decision tree in Awassi sheep. *Animal Biotechnology*. 2022; 33(1): 167–173. <https://doi.org/10.1080/10495398.2021.1975727>
13. Plemyashov K.V., Belikova A.O. Innovative molecular genetic technologies in animal husbandry. *Current issues of animal reproductive health. Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of Vyatka State Agrotechnological University and the 95th anniversary of the birth of the Honored Scientist of the Russian Federation Doctor of Veterinary Sciences, Professor A.I. Varganov*. Syktyvkar: Federal Research Center “Komi Scientific Center” of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2025; 317–322 (in Russian). <https://elibrary.ru/gjtnqc>
14. Khamiruev T.N., Goncharenko G.M., Khoroshilova T.S. Association of GDF9/G1, CAST, KRT1.2, KAP1.3 gene polymorphism with economically useful traits of sheep breeds in the Trans-Baikal Territory. *Actual problems of agriculture and development prospects. Materials of the All-Russian (national) Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Scientific Research Institute of Veterinary Medicine of Eastern Siberia, a branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences, and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences*. Chita: State Institution of Continuing Professional Education “Institute for Education Development of the Trans-Baikal Territory”. 2024; 137–144 (in Russian). <https://elibrary.ru/rmgwjg>
15. Selionova M.I., Kovalev D.A., Skorykh L.N., Safonova N.S., Efimova N.I. Research of growth hormone, leptin gene polymorphism in speep of Soviet Merino breed. *Agricultural Bulletin of Stavropol region*. 2019; (3): 25–29 (in Russian). <https://elibrary.ru/rkalwl>
16. Greguła-Kania M., Gruszecki T.M., Junkuszew A., Juszcuk-Kubiak E., Florek M. Association of CAST gene polymorphism with carcass value and meat quality in two synthetic lines of sheep. *Meat Science*. 2019; 154: 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.04.007>
17. Skorykh L.N., Sukhoveeva A.V., Skokova A.V., Bobryshov S.S. Association of single nucleotide polymorphisms in GH, CAST genes with slaughter qualities in Manych Merino sheep. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023; 106(4): 57–67 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-57>
18. Valencia C.P.L., Franco L.Á.Á., Herrera, D.H. Association of single nucleotide polymorphisms in the CAPN, CAST, LEP, GH, and IGF-1 genes with growth parameters and ultrasound characteristics of the Longissimus dorsi muscle in Colombian hair sheep. *Tropical Animal Health and Production*. 2022; 54(1): 82. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03086-x>
19. Ozdemirov A.A., Chizhova L.N., Khozhokov A.A., Surzhikova E.S., Dogeev G.D., Abdulmagomedov S.Sh. Polymorphism of genes CAST, GH, GDF9 of sheep of the Dagestan mountain breed. *South of Russia: ecology, development*. 2021; 16(2): 39–44 (in Russian). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-2-39-44>
20. Chizhova L.N., Surzhikova E.S., Zabelina M.V., Lutsiva E.D., Efimova N.I. Polymorphism of GH, CAST genes in sheep in connection with resistance indicators. *Agrarian Scientific Journal*. 2020; (12): 75–77 (in Russian). <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i12pp75-77>
21. Ayuk J., Sheppard M.C. Growth hormone and its disorders. *Postgraduate Medical Journal*. 2006; 82(963): 24–30. <https://doi.org/10.1136/pgmj.2005.036087>
22. Veremeyenko O.S., Evlagina D.D., Surzhikova E.S., Mikhailenko T.N. Polymorphism of the growth hormone (GH) gene in North Caucasian meat-and-wool sheep. *Youth science — for the development of the agro-industrial complex. Materials V International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Kursk: Kursk State Agrarian University named after I.I. Ivanov. 2025; 270–275 (in Russian). <https://elibrary.ru/iuncdm>
23. Koshchaev A.G., Svyatenko T.S. Relationship between the results of genomic assessment of productivity indicators of Holstein cattle and allelic variants of the growth hormone gene GH1. *Modern advances in genetics and breeding of farm animals. Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 120th anniversary of the St. Petersburg State Agrarian University*. St. Petersburg: Saint Petersburg State Agrarian University. 2025; 26–29 (in Russian). <https://elibrary.ru/mlpofb>
24. Gorlov I.F. et al. Association of the growth hormone gene polymorphism with growth traits in Salsk sheep breed. *Small Ruminant Research*. 2017; 150: 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.02.019>
25. Singh P.P., Tomar S.S., Thakur M.S., Kumar A. Polymorphism and association of growth hormone gene with growth traits in Sirohi and Barbari breeds of goat. *Veterinary World*. 2015; 8(3): 382–387. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2015.382-387>
26. Bayraktar M., Shoshin O. Estimation of the associations between GH and DGAT1 genes and growth traits by using decision tree in Awassi sheep. *Animal Biotechnology*. 2022; 33(1): 167–173. <https://doi.org/10.1080/10495398.2021.1975727>

27. Wahyudi F.E., Susilorini T.E., Maylinda S. Association of growth hormone gene polymorphisms with growth traits in texel crossbreed. Adli D.N., Pramujio M., Yekti A.P.A. (eds.). *Developing Modern Livestock Production in Tropical Countries. Proceedings of the 5th Animal Production International Seminar (APIS 2022)*. CRC Press. 2023; 100–102.
<https://doi.org/10.1201/9781003370048-24>
28. Kaplan S., Atalay S. Determination of Calpastatin Gene Polymorphism in Kivircik Crossbred Ewes by PCR-RFLP Method. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*. 2017; 31(3): 147–150.
<https://doi.org/10.15316/SJAFS.2017.47>
29. Куликова А.Я. Полиморфизм гена соматотропина (GH) у овец южной мясной породы. *Сборник научных трудов КНЦЗВ*. 2023; 12(1): 13–17.
<https://doi.org/10.48612/sbornik-2023-1-4>

ОБ АВТОРАХ

Шолпан Бахтыбеккызы

магистр
sholpan_bsb@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0615-7880>

Айжан Сеилкановна Мусаева

кандидат биологических наук,
ассоциированный профессор
aimus_@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2871-1552>

Зарина Сейсеновна Оразымбетова

магистр, старший научный сотрудник
orazymbetova.z@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5085-8561>

Берик Серикович Арынгазиев

кандидат сельскохозяйственных наук
berik_aryngaziev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0256-4972>

Сабина Алимжановна Алаева

магистр
sabina.alayeva@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2314-5408>

Айдана Куандыковна Бекитаева

магистр
aidana.bekitayeva@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7301-6626>

Кайырлы Бейсенович Омашев

кандидат сельскохозяйственных наук
okairly@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1140-7722>

Елболсын Сагдат

магистр
sagdat.92@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7605-9787>

Нурлан Икласович Малмаков

доктор сельскохозяйственных наук
nurlan_malmakov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5242-6658>

Институт генетики и физиологии,
пр-т Аль-Фараби, 93, Алматы, 050060, Казахстан

27. Wahyudi F.E., Susilorini T.E., Maylinda S. Association of growth hormone gene polymorphisms with growth traits in texel crossbreed. Adli D.N., Pramujio M., Yekti A.P.A. (eds.). *Developing Modern Livestock Production in Tropical Countries. Proceedings of the 5th Animal Production International Seminar (APIS 2022)*. CRC Press. 2023; 100–102.
<https://doi.org/10.1201/9781003370048-24>
28. Kaplan S., Atalay S. Determination of Calpastatin Gene Polymorphism in Kivircik Crossbred Ewes by PCR-RFLP Method. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*. 2017; 31(3): 147–150.
<https://doi.org/10.15316/SJAFS.2017.47>
29. Kulikova A.Ya. Polymorphism of somatotropin (GH) gene in sheep of the southern meat breed. *Collection of Scientific Papers of KRCAHVM*. 2023; 12(1): 13–17 (in Russian).
<https://doi.org/10.48612/sbornik-2023-1-4>

ABOUT THE AUTHORS

Sholpan Bakhtybekkyzy

Master
sholpan_bsb@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0615-7880>

Aizhan Seilkanovna Musayeva

Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor
aimus_@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2871-1552>

Zarina Seisenovna Orazymbetova

Master, Senior Researcher
orazymbetova.z@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5085-8561>

Berik Serikovich Aryngaziyev

Candidate of Agricultural Sciences
berik_aryngaziev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0256-4972>

Sabina Alimzhanovna Alayeva

Master
sabina.alayeva@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2314-5408>

Aidana Kuandykovna Bekitayeva

Master
aidana.bekitayeva@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7301-6626>

Kairly Beisenovich Omashev

Candidate of Agricultural Sciences
okairly@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1140-7722>

Elbolsyn Sagdat

Master
sagdat.92@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7605-9787>

Nurlan Iklasovich Malmakov

Doctor of Agricultural Sciences
nurlan_malmakov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5242-6658>

Institute of Genetics and Physiology,
93 Al-Farabi Ave., Almaty, 050060, Kazakhstan

Н.А. Волкова ✉

А.Н. Ветох

Л.А. Волкова

Федеральный исследовательский
центр животноводства — ВИЖ
им. академика Л.К. Эрнста,
пос. Дубровицы, Подольск,
Московская обл., Россия

✉ natavolkova@inbox.ru

Поступила в редакцию: 06.06.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Волкова Н.А., Ветох А.Н., Волкова Л.А.

Natalia A. Volkova ✉

Anastasia N. Vetokh

Ludmila A. Volkova

L.K. Ernst Federal Research Center for
Animal Husbandry, Dubrovitsy, Moscow
region, Russia

✉ natavolkova@inbox.ru

Received by the editorial office: 06.06.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Volkova N.A., Vetokh A.N., Volkova L.A.

Идентификация SNP и генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек на основе данных полногеномного генотипирования

РЕЗЮМЕ

Поиск генетических маркеров, детерминирующих формирование и степень проявления перспективных фенотипов селекционно значимых признаков у кур, является одной из приоритетных задач геномной селекции, направленной на повышение и реализацию их продуктивного потенциала.

Цели исследований — поиск и идентификация однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) и генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек на основе данных полногеномного генотипирования.

Объектом исследований являлись куры F2 ресурсной популяции, полученной посредством межпородного скрещивания двух контрастных по яичной продуктивности пород — русской белой и корниш ($n = 94$). Особей оценивали по массе первого яйца в начале яйцекладки. Для полногеномного генотипирования кур F2 использовали ДНК-чип Illumina Chicken 60K SNP iSelect BeadChip. На основании полученных данных фенотипа и генотипа проводили полногеномные ассоциативные исследования. Выявлены 7 достоверно значимых SNP ($p < 1,06 \times 10^{-5}$), ассоциированных с массой первого яйца у кур F2 ресурсной популяции. В области данных SNP идентифицированы 26 генов, в том числе в позициях SNP — 3 гена (*MPP7*, *SNTG1*, *SEPTIN11*). Установлено, что генотипы GG по локусу Gga_rs15141739 (ген *SNTG1*) и AA по локусу GGaluga162050 детерминируют более высокую массу первого яйца у кур ($p < 0,01$).

Ключевые слова: куры, масса яйца, SNP, гены-кандидаты, GWAS

Для цитирования: Волкова Н.А., Ветох А.Н., Волкова Л.А. Идентификация SNP и генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек на основе данных полногеномного генотипирования. *Аграрная наука*. 2025; 400 (11): 68–75. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-68-75>

Identification of SNPs and candidate genes associated with first egg weight in laying hens based on whole-genome genotyping data

ABSTRACT

The search for genetic markers and their identification that determine the formation and degree of manifestation of promising phenotypes for economically important traits in chickens is one of the priority tasks of genomic selection.

The research objectives are to search for and identify single nucleotide polymorphisms (SNPs) and candidate genes associated with the weight of the first egg in laying hens based on genome-wide genotyping data.

The object of the study was F2 hens of the resource population obtained by interbreeding two breeds with contrasting egg productivity — Russian White and Cornish ($n = 94$). F2 individuals were assessed by the weight of the first egg at the beginning of laying. For whole-genome genotyping of F2 hens, the Illumina Chicken 60K SNP iSelect BeadChip DNA chip was used. Based on the obtained phenotype and genotype data, whole-genome association studies were performed. Seven significant SNPs ($p < 1.06 \times 10^{-5}$) associated with the first egg weight in F2 resource population hens were identified. The 26 genes were identified in the SNP data area, including 3 genes in SNP positions (*MPP7*, *SNTG1*, *SEPTIN11*). It was established that genotypes GG at the Gga_rs15141739 locus (*SNTG1*) and AA at the GGaluga162050 locus cause a high weight of the first egg ($p < 0.01$).

Key words: chicken, egg weight, SNP, candidate genes, GWAS

For citation: Volkova N.A., Vetokh A.N., Volkova L.A. Identification of SNPs and candidate genes associated with first egg weight in laying hens based on whole-genome genotyping data. *Agrarian science*. 2025; 400 (11): 68–75 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-68-75>

Введение/Introduction

Птицеводство — одна из значимых отраслей аграрного сектора и вносит весомый вклад в обеспечение продовольственной безопасности страны [1–3]. Данная отрасль является уникальной с точки зрения обеспечения населения двумя высокобелковыми продуктами питания – диетическим мясом и яйцом [4, 5]. Устойчивое развитие и конкурентоспособность птицеводческой отрасли связаны прежде всего с использованием высокопродуктивных пород, линий и кроссов птицы [6, 7].

В условиях промышленного производства яиц важное значение приобретает целенаправленная селекция птицы по комплексу показателей, определяющих высокую яичную продуктивность [8, 9]. Одним из таких показателей является масса яйца. Как правило, на яйца с более высокой массой имеется высокий потребительский спрос [1, 10]. Кроме того, от массы товарных яиц зависит их категория, которая определяет стоимость реализации населению данной продукции, что в определенной мере определяет рентабельность производства [11, 12].

Масса инкубационного яйца влияет на интенсивность развития эмбрионов и вес вылупившихся цыплят. Было показано, что цыплята, выведенные из крупных яиц, характеризовались более высокой живой массой и скоростью роста по сравнению с цыплятами, полученными из более мелких яиц [13–15].

Определенный интерес для практики представляет показатель массы яйца в начале яйцекладки, в том числе масса первого яйца. Данный показатель характеризует общий потенциал яйцекладки и влияет на размер яиц, которые птица будет откладывать на протяжении всей своей жизни. Так, в исследовании Ni *et al.* (2023) были установлены высокие коэффициенты корреляции (0,72–1,00) между показателями массы яйца у кур в различные возрастные периоды, в том числе между последовательно учитываемыми возрастами [16].

Исходя из вышеизложенного, селекция птицы по данному показателю при создании линий и кроссов для промышленного ее использования является востребованной и актуальной.

Показатель массы яйца зависит от нескольких факторов, прежде всего таких как генотип [17, 18], кормление [19] и условия содержания [20], а также возраст несушек [21].

Генетические факторы определяют продуктивный потенциал птицы, в то время как средовые факторы обеспечивают его реализацию. Генетическая обусловленность показателя массы яйца у самок-несушек в различные периоды их продуктивного использования была установлена в ряде исследований [17, 22]. С использованием полногеномных исследований выявлены генетические маркеры, связанные с данным показателем у разных видов сельскохозяйственной птицы [17, 22, 23].

С учетом вышеизложенного для селекции и отбора птицы с высоким продуктивным потенциалом являются актуальными и востребованными для практики поиск и идентификация генетических маркеров, ассоциированных с показателями массы яйца, в том числе в начале яйцекладки.

Цели данного исследования — поиск достоверно значимых однонуклеотидных полиморфизмов (single nucleotide polymorphism, SNP) и идентификация генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования по поиску и идентификации генетических маркеров, ассоциированных с массой первого яйца у кур, проводили на базе ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста» в 2024–2025 гг. (пос. Дубровицы, г. о. Подольск, Московская обл., Россия).

Представленные в работе эксперименты на птице были одобрены и выполнялись в соответствии с этическими рекомендациями, утвержденными Комиссией по биоэтике ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (протокол от 15 января 2024 года № 1).

Объектом исследований служили куры-несушки F2 ресурсной популяции ($n = 94$). Данная популяция была получена посредством серии скрещиваний двух пород, контрастных по показателям яичной продуктивности, — русской белой (яичная порода) и корниш (мясная порода). На первом этапе были получены особи F1 при скрещивании самцов русской белой породы ($n = 4$) с самками породы корниш ($n = 20$). При дальнейших скрещиваниях особей F1 между собой получена птица F2, которая была использована в качестве модельной ресурсной популяции для молекулярно-генетических исследований. В зависимости от используемых для получения ресурсной популяции самцов исходной родительской породы (русской белой) особи F2 ресурсной популяции были разделены на 4 группы (F2_1, F2_2, F2_3, F2_4) для проведения сравнительного анализа полученных фенотипических данных.

Экспериментальную птицу во все периоды выращивания содержали в помещениях с приточной вентиляцией. Цыплята содержались в брудерах до возраста 3 недель, затем их переводили на напольное содержание.

Самок F2 перед началом яйцекладки рассаживали в индивидуальные клетки батарейного типа для индивидуального учета массы первого яйца. Взвешивание яиц проводили на лабораторных весах (Ohaus, США), СИЗ поверены не позднее суток после снесения.

Для получения ДНК была использована пульпа пера. Выделение ДНК проводили с применением коммерческого набора «ДНК Экстран-2» (ООО «НПФ Синтол», Россия) в соответствии с

протоколом, рекомендованным производителем. Чистоту выделенной ДНК оценивали на спектрофотометре NanoPhotometer N60 (Thermo Fisher Scientific, США), концентрацию — на флуориметре Qubit 2.0 (Invitrogen/Life Technologies, США).

Генотипирование кур проводили с использованием ДНК-чипа Illumina Chicken iSelect BeadChip, содержащим 60 тыс. SNP. Для каждого образца были выполнены контроль качества и фильтрация данных генотипирования с применением программного пакета PLINK 1.9¹.

Визуализацию полученных данных проводили в R-studio — интегрированной среде разработки для языка программирования R².

Поиск генов-кандидатов, локализованных в области идентифицированных SNP, проводили с привлечением геномного ресурса Gallus gallus (chicken)³. Для функциональной аннотации генов использовали базы данных GeneCards⁴ и программы DAVID⁵.

Статистическую обработку полученных экспериментальных данных осуществляли с использованием пакета для анализа данных в приложении Microsoft Excel. Вычисляли средние значения показателей (M), стандартные ошибки средних ($\pm$ SEM), минимальные (min) и максимальные (max) значения, коэффициенты вариации (CV, %).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Успешность поиска и идентификации генетических маркеров, ассоциированных с селекционно значимыми признаками у сельскохозяйственных животных и птицы, во многом определяется информативностью используемой для полногеномных ассоциативных исследований базы фенотипов по изучаемому признаку. Популяция особей, используемая для поиска полногеномных ассоциаций однонуклеотидных полиморфизмов, должна характеризоваться прежде всего высокой изменчивостью фенотипов по оцениваемому признаку.

Одним из подходов к формированию такой модельной высокоинформативной популяции является получение межпородных помесей или гибридов F2 с использованием пород, контрастных по интересующему исследователя селекционному признаку. Данный подход находит широкое применение в птицеводстве при проведении молекулярно-генетических исследований по поиску и идентификации генетических маркеров продуктивности и других селекционно значимых признаков у разных видов сельскохозяйственной птицы [23–25].

В настоящих исследованиях были использованы две породы кур — русская белая и корниш, различающиеся по показателям яичной

Таблица 1. Масса первого яйца у кур-несушек F2 ресурсной популяции в зависимости от происхождения

Table 1. The first egg weight in F2 laying hens of the resource population depending on the genotype

Группа	n	Среднее	Ошибка	CV, %
F2_1	8	30,25 ^{a, d}	1,42	13,31
F2_2	43	32,56 ^{b, c}	0,57	11,56
F2_3	22	30,02 ^{c, d, b, c}	1,17	18,33
F2_4	21	33,91 ^{a, d, c, d}	1,22	16,42
В среднем по популяции	94	32,07	0,50	15,04

Примечание: достоверность различий на уровне $p < 0,05$ между группами a — F2_1, b — F2_2, c — F2_3, d — F2_4; CV, % — коэффициент вариации.

продуктивности. Полученная в результате серии скрещиваний популяция кур F2 характеризовалась высокой изменчивостью по массе первого яйца.

В таблице 1 представлены результаты оценки кур-несушек F2 ресурсной популяции по массе первого яйца в зависимости от их происхождения.

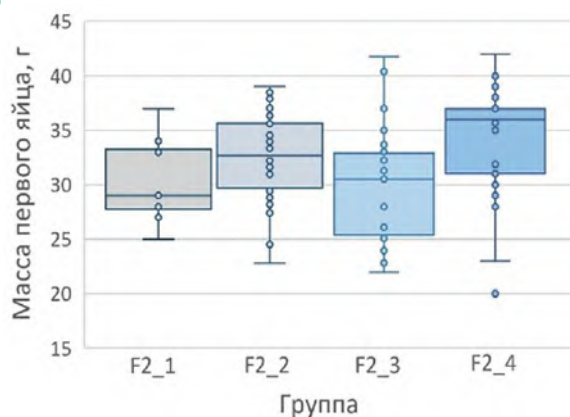
Средняя масса первого яйца у кур исследуемой популяции составила $32,07 \pm 0,50$ г. При этом отмечались различия по данному показателю в отдельных группах кур в зависимости от происхождения — самцов F1, используемых для получения особей F2 (группы F2_1 — F2_4).

Несушки групп F2_2 и F2_4 превосходили по массе первого яйца птицу групп F2_1 и F2_3 на 11–12% ($p < 0,05$, табл. 1, рис. 1).

Коэффициент вариации по массе первого яйца в среднем по всей исследуемой F2 ресурсной популяции составил 15,04%. Внутри групп F2 данный показатель варьировал от 11,56 до 18,31%, максимальные значения были установлены в группах F2_3 и F2_4.

Рис. 1. Распределение значений показателя масса первого яйца у кур F2 ресурсной популяции. Показаны медиана, распределение значений данных, минимальные и максимальные значения

Fig. 1. Value distribution of the first egg weight trait in F2 hens of the resource population. The median, boxes, minimum and maximum values are shown



¹ <http://zzz.bwh.harvard.edu/plink/>

² <https://gb.ru/blog/yazyk-programmirovaniya-r/>

³ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genome/>

⁴ <http://www.genecards.org/>

⁵ <https://david.ncifcrf.gov/>

Распределение полученных фенотипических данных по массе первого яйца у кур ресурсной популяции, как внутри групп F2, так и между группами F2, с указанием медианы, минимальных и максимальных значений изученного показателя наглядно представлено на рисунке 1.

Полученные фенотипические данные по массе яйца кур ресурсной популяции были использованы для проведения полногеномных ассоциативных исследований. В ходе проведенного GWAS-анализа на уровне установленного порога достоверности были выявлены 7 однонуклеотидных полиморфизмов (SNP), ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек исследованной популяции. Данные SNP были локализованы на двух хромосомах — GGA2 и GGA4.

На хромосоме GGA2 были выявлены 6 достоверно значимых SNP, на хромосоме GGA4 — 1 SNP, что наглядно показано на рисунке 2.

Установленные достоверно значимые SNP были использованы для поиска генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у несушек. В области выявленных SNP были идентифицированы 26 генов, имеющих описание в базе данных NCBI. При этом установлены 3 гена — *MPP7*, *SNTG1*, *SEPTIN11*, внутри которых были локализованы идентифицированные SNP. Данные гены были определены как приоритетные.

Перечень SNP и генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур F2 ресурсной популяции, представлен в таблице 2.

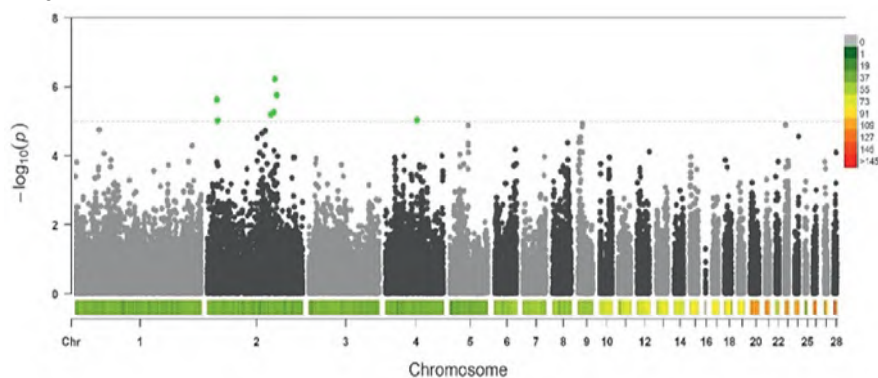
Функциональная аннотация выявленных в данном исследовании генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур F2 ресурсной популяции, представлена в таблице 3.

Согласно данным таблицы 3, выявленные гены отвечают за биологические функции, связанные с морфогенезом и дифференцировкой клеток, регуляцией клеточного цикла и межклеточной адгезией, метаболизмом липидов.

Анализ открытых информационных источников показал, что из 26 установленных в данном исследовании генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек, только для одного гена *SHROOM3* ранее в исследованиях других научных коллективов была показана его связь с массой яйца у кур. Так, Liao *et al.* (2016) на курах породы леггорн и аборигенных китайских курах породы дунсян

Рис. 2. Manhattan plot для показателя «масса первого яйца» у кур F2 ресурсной популяции: распределение SNP на хромосомах (ось X) в соответствии с предполагаемым вероятностным порогом достоверности $p < 1,06 \times 10^{-5}$ (пунктирная линия). Зеленым цветом выделены SNP, имеющие достоверно значимые ассоциации с массой первого яйца при $p < 1,06 \times 10^{-5}$

Fig. 2. Manhattan plot for the “first egg weight” trait in F2 hens resource population: X-axis — SNP distribution on chromosomes, the assumed probability threshold of significance $p < 1.06 \times 10^{-5}$ (dashed line). Significant associations (SNP) at $p < 1.06 \times 10^{-5}$ are highlighted in green



(Dongxiang) на основе данных полногеномного генотипирования была установлена мутация в гене *SHROOM3*, находящемся на хромосоме 4 (GGA4), в позиции 49285522 bp, оказывающая достоверное влияние (P -value 4.89×10^{-9}) на массу яйца. Это подтверждает полученные авторами данные о прямом влиянии гена *SHROOM3* на массу первого яйца у кур-несушек [26].

В работе Jin *et al.* (2015) была установлена достоверно значимая связь гена *GPR158* с живой массой кур породы китайская шелковая в возрасте 28 дней [27]. Масса яйца у кур несушек коррелирует с их живой массой [28], что можно рассматривать как косвенное подтверждение полученных авторами данных о влиянии гена *GPR158* на массу первого яйца у кур-несушек.

С целью подтверждения связи выявленных SNP и генов-кандидатов с показателем массы первого яйца у кур-несушек были изучены корреляции аллельных вариантов идентифицированных локусов с данным признаком.

На основании анализа распределения генотипов по аллельным вариантам 7 выявленных в данном исследовании локусов для дальнейших исследований были выбраны 2 SNP — GGalGA162050 и Gga_rs15141739 (ген *SNTG1*),

Таблица 2. SNP и гены-кандидаты, ассоциированные с массой первого яйца у кур F2 ресурсной популяции

Table 2. SNPs and candidate genes associated with first egg weight in F2 hens of the resource population

GGA	SNP	Позиция	p	Ген ($\pm 0,2$ Mb)
2	Gga_rs13539028	15453853	$2,41 \times 10^{-6}$	<i>BAMBI</i> , <i>WAC</i> , <i>MPP7</i> *, <i>ODAD2</i>
2	Gga_rs14144125	16427603	$9,67 \times 10^{-6}$	<i>GAD2</i> , <i>MYO3A</i> , <i>GPR158</i>
2	Gga_rs14224947	99622507	$6,42 \times 10^{-6}$	<i>LAMA1</i> , <i>ARHGAP28</i>
2	Gga_rs16090771	104361807	$5,48 \times 10^{-6}$	<i>TAF4B</i> , <i>KCTD1</i> , <i>AQP4</i> , <i>CHST9</i>
2	GGa162050	105864711	$5,96 \times 10^{-7}$	<i>DSG1</i>
2	Gga_rs15141739	108960344	$1,76 \times 10^{-6}$	<i>SNTG1</i> *
4	Gga_rs14467180	49703583	$2,41 \times 10^{-6}$	<i>ERI1</i> , <i>PPP1R3B</i> , <i>CLDN23</i> , <i>PRAG1</i> , <i>MBOAT4</i> , <i>CL2</i> , <i>CCNI</i> , <i>SEPTIN11</i> *, <i>CG-16</i> , <i>SHROOM3</i> , <i>STBD1</i>

Примечание: GGA — хромосома; * гены в позиции SNP.

Таблица 3. Функциональная аннотация генов-кандидатов, ассоциированных с массой первого яйца у кур F2 ресурсной популяции

Table 3. Functional annotation of candidate genes associated with first egg weight in F2 hens of the resource population

Chr	Гены	Функциональная аннотация (http://www.genecards.org/)
2	<i>BAMBI</i>	Ингибирует сигнальные пути BMP и TGF- β , участвует в регуляции клеточной дифференцировки и морфогенеза.
	<i>WAC</i>	Участвует в регуляции транскрипции и репарации ДНК, влияет на клеточный цикл и пролиферацию.
	<i>MPP7</i>	Участвует в формировании и стабилизации клеточных соединений, влияет на межклеточную адгезию.
	<i>ODAD2</i>	Участвует в обеспечении движения ресничек и жгутиков.
	<i>GAD2</i>	Кодирует декарбоксилазу глутаминовой кислоты, преобразует глутамат в ГАМК, главный тормозной нейромедиатор, может играть роль в развитии синдрома мышечной скованности и способствует повышению болевой чувствительности у животных
	<i>MYO3A</i>	Участвует в движении микроворсинок и фоторецепторов, влияет на восприятие звука и зрения.
	<i>GPR158</i>	Участвует в регуляции нейропластичности (активности глициновых рецепторов), обеспечивает локализацию белка в плазматической мембране.
	<i>LAMA1</i>	Влияет на формирование внеклеточного матрикса и клеточную адгезию.
	<i>ARHGAP28</i>	Влияет на реорганизацию цитоскелета и клеточную подвижность, участвует в сосудистой регуляции, функционирует как опухолевый супрессор, сбалансированная экспрессия которого важна для контроля пролиферации бласты и регулируемого восстановления тканей.
	<i>TAF4B</i>	Участвует в инициации транскрипции, играет важную роль в репродуктивном здоровье (азооспермия, преждевременная недостаточность яичников), влияет на гаметогенез.
	<i>KCTD1</i>	Регулирует активность ионных каналов, гомеостаз тканей, влияет на передачу сигналов, способствует процессам дифференцировки в почках и эктодерме.
	<i>AQP4</i>	Регулирует водный баланс и осмотическое давление в клетках.
	<i>CHST9</i>	Участвует в сульфатировании углеводов, влияет на структуру гликопротеинов, играет важную роль в межклеточном взаимодействии, передаче сигналов и эмбриональном развитии.
	<i>DSG1</i>	Участвует в формировании десмосом, влияет на прочность эпидермиса, барьерную функцию и клеточную адгезию: скрепляет соседние клетки, координирует протеолитический оборот и передачу сигналов о дифференцировке, а его дисфункция приводит к целому ряду заболеваний кожи и слизистых оболочек.
4	<i>SNTG1</i>	Участвует в экзоцитозе и секреции нейромедиаторов, в организации мембраносвязанных сигнальных комплексов при развитии нервной системы.
	<i>ERI1</i>	Участвует в гомеостазе и деградации РНК, влияет на регуляцию экспрессии генов.
	<i>PPP1R3B</i>	Влияет на метаболизм гликогена и глюкозы в печени, скелетной мускулатуре и крови, может играть роль в гликемическом контроле.
	<i>CLDN23</i>	Формирует плотные контакты, влияет на барьерные функции эпителия.
	<i>PRAG1</i>	Регулирует реорганизацию актинового цитоскелета, играет важную роль в регулировании других киназ, стимулируя миграцию клеток, то есть влияет на морфологию и дифференцировку нейронов.
	<i>MBOAT4</i>	Участвует в синтезе эфирных липидов, влияет на липидный обмен.
	<i>CCNI</i>	Регулирует клеточный цикл и пролиферацию, способствует временной координации каждого митотического события.
	<i>SEPTIN11</i>	Участвует в цитокинезе и формировании цитоскелета, может влиять на метаболизм адипоцитов и связанные с ним метаболические состояния.
	<i>SHROOM3</i>	Участвует в изменении формы клеток, критически важен во время эмбриогенеза: влияет на закрытие нервной трубки и формирование тканей, является ключевым регулятором ремоделирования цитоскелета.
	<i>STBD1</i>	Связывается с крахмалом, участвует в пищеварении углеводов.

локализованные на хромосоме GGA2. Выбор данных SNP был обусловлен наличием в исследованной популяции достаточного для анализа количества особей с генотипами по всем трем аллельным вариантам локусов.

Масса первого яйца у кур F2 ресурсной популяции в зависимости от генотипа по локусам GGAluGA162050 и Gga_rs15141739 (ген *SNTG1*) представлена в таблице 4.

Частота генотипов AA, AG и GG по локусу GGAluGA162050 (2:105864711) в исследованной популяции кур составила, соответственно, 0,127, 0,340 и 0,532. По частоте генотипов AA, AG и GG в локусе Gga_rs15141739 (2:108960344) отмечалось следующее распределение особей: 0,272, 0,617 и 0,213, соответственно.

Таблица 4. Ассоциации аллельных вариантов локусов (SNP) с массой первого яйца кур F2 ресурсной популяции

Table 3. The association between allelic variants of loci (SNP) and the first egg weight in the resource population F2 hens

Генотип	GGAluGA162050 (2:105864711)		Gga_rs15141739 (2:108960344)	
	n	M $\pm$ m	n	M $\pm$ m
AA	12	28,23 $\pm$ 0,60 ^{ac}	16	34,33 $\pm$ 1,09 ^{a, c, a, b}
AG	32	29,16 $\pm$ 0,92 ^{b, c}	58	33,07 $\pm$ 0,55 ^{a, b}
GG	50	33,58 $\pm$ 0,47 ^{a, c, b, c}	20	28,38 $\pm$ 0,84 ^{a, c}

Примечание: достоверность различий на уровне $p < 0,001$ между генотипами a — AA, b — AG, c — GG.

Максимальную массу первого яйца отмечали у кур с генотипом GG по локусу GGalUGA162050 (2:105864711) и с генотипом AA по локусу Gga_rs15141739 (2:108960344). Показатель массы яйца в данных группах кур достигал, соответственно, $33,58 \pm 0,47$ и $34,33 \pm 1,09$ г.

Куры с генотипом GG по локусу GGalUGA162050 превосходили по массе яйца особей с генотипами AA и AG на 19% ($p < 0,001$) и 15% ($p < 0,001$) соответственно (рис. 3А).

По аллельным вариантам локуса Gga_rs15141739 отмечалась обратная тенденция. Аллель А в данном локусе коррелировал с более высокой массой первого яйца (рис. 3Б).

Различия по данному показателю между курами с генотипом AA и особями с генотипами AG и GG составили 17% и 14% соответственно ($p < 0,001$).

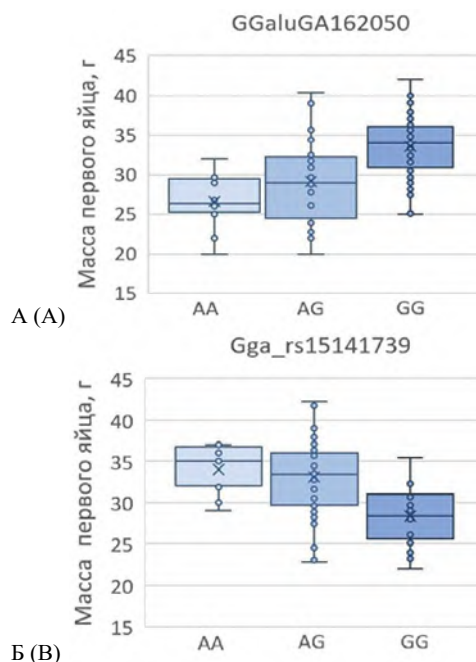
Выводы/Conclusions

В ходе проведенных исследований на специально созданной модельной ресурсной популяции выявлены 7 достоверно значимых SNP, ассоциированных с массой первого яйца у кур-несушек. В позициях данных SNP идентифицированы 3 гена — *MPP7*, *SEPTIN11*, *SNTG1*, локализованные на хромосомах GGA2 и GGA4.

Установлено влияние аллельных вариантов 2 выявленных локусов Gga_rs15141739 и GGalUGA162050 на показатель массы первого яйца у кур F2 ресурсной популяции. Подтверждена достоверно значимая связь ($p < 0,001$) генотипов GG по локусу Gga_rs15141739 (ген *SNTG1*) и AA по

Рис. 3. Распределение значений массы первого яйца у кур ресурсной популяции в зависимости от генотипа по локусам GGalUGA162050 (А) и Gga_rs15141739 (Б)

Рис. 3. Distribution of first egg mass values in the chicken resource population by genotype at loci GGalUGA162050 (А) and Gga_rs15141739 (Б)



локусу GGalUGA162050 с высокой массой первого яйца у кур исследованной популяции.

Идентифицированные в данном исследовании SNP и гены-кандидаты могут быть в дальнейшем исследованы и использованы в качестве генетических маркеров в геномной селекции кур, направленной на повышение массы яйца.

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 при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FGGN-2024-0015).

FUNDING

This research was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FGGN-2024-0015).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Буюров А.В., Буюров В.С. Роль отрасли птицеводства в обеспечении продовольственной безопасности России. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020; (7): 84–95. <https://www.elibrary.ru/uuutfr>
- Чернявская С.А., Лебедев С.А., Чумаченко Е.М. Анализ динамики развития птицеводства в регионах России и его роль в обеспечении продовольственной безопасности. *Журнал прикладных исследований*. 2025; (4): 66–74. <https://www.elibrary.ru/ucbfyn>
- Козерод Ю.М., Воробьева Н.В. Особенности и тенденции развития яичного птицеводства России на современном этапе. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2024; 7(113): 188–194. <https://doi.org/10.33938/247-188>
- Баюров Л.И., Гвоздева Ю.М. Состояние и перспективы развития птицеводства яичного направления. Современные проблемы в животноводстве: состояние, решения, перспективы. Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию академика В.Г. Рядчикова. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 319–325. <https://www.elibrary.ru/pwamxo>

REFERENCES

- Buyarov A.V., Buyarov V.S. The role of the poultry industry in ensuring food security in Russia. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*. 2020; (7): 84–95 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/uuutfr>
- Chernyavskaya S.A., Lebedev S.A., Chumachenko E.M. Analysis of the dynamics of poultry farming in the regions of Russia and its role in ensuring food security. *Journal of Applied Research*. 2025; (4): 66–74 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ucbfyn>
- Kozerod Yu.M., Vorobyova N.V. Features and trends in the development of egg poultry farming in Russia at the present stage. *Economy, labor, management in agriculture*. 2024; 7(113): 188–194 (in Russian). <https://doi.org/10.33938/247-188>
- Bayurov L.I., Gvozdeva Yu.M. State and prospects for the development of egg poultry farming. *Modern problems in animal husbandry: status, solutions, prospects. Collection of articles based on the materials of the II International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of Academician V.G. Ryadchikov*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 319–325 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pwamxo>

5. Тюменцева В.С., Попов П.А., Бабунова В.С., Савинова Е.П., Осипова И.С. Бактериальная обсемененность товарного куриного яйца. *Аграрная наука*. 2025; (4): 63–68. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-63-68>
6. Гвоздева Ю.М. Экстерьерные и интерьерные маркеры потенциальной продуктивности птицы. *Современные векторы развития науки. Сборник статей по материалам Ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 267–268. <https://www.elibrary.ru/brrpbe>
7. Буюров А.В., Воронцова Е.В. Производство яиц и мяса птицы: тренды, проблемы, перспективы развития. *Актуальные проблемы ветеринарии и интенсивного животноводства. Сборник трудов Международной научно-практической конференции*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2024; 29–36. <https://www.elibrary.ru/ibsttf>
8. Chomchuen K., Tuntiyasawadikul V., Chankitisakul V., Boonkum W. Genetic Evaluation of Body Weights and Egg Production Traits Using a Multi-Trait Animal Model and Selection Index in Thai Native Synthetic Chickens (Kaimook e-san2). *Animals*. 2022; 12(3): 335. <https://doi.org/10.3390/ani12030335>
9. Обожица Е.П., Чепуштанова О.В. Яичное направление сельскохозяйственных птиц. *Приоритетные направления развития аграрной науки и технологий. Сборник тезисов научно-практической конференции, посвященной 75-летию юбилею факультета биотехнологии и пищевой инженерии*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 290–291. <https://www.elibrary.ru/kxsonu>
10. Кавтарашвили А.Ш. Куриное яйцо. Часть 2. Факторы, влияющие на массу яиц. *Наше сельское хозяйство*. 2024; 16(336): 65–67. <https://www.elibrary.ru/fjzwxu>
11. Лосевская С.А., Ильин В.Г. Категории яиц, их характеристики и способы хранения. *Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященной 110-летию со дня рождения И.С. Кауричева. Материалы конференции*. Калуга: ИП Якунина В.А. 2024; 59–61. <https://www.elibrary.ru/cjpxjh>
12. Аржанкова Ю.В., Прирезова Е.А. Сравнительная оценка куриных яиц разных категорий. *Современное состояние и инновационные пути развития агропромышленного комплекса в РФ. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Дню науки. Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия*. 2025; 9–15. <https://www.elibrary.ru/cjqrbf>
13. Nangsuay A., Ruangpanit Y., Meijerhof R., Attamangkune S. Yolk absorption and embryo development of small and large eggs originating from young and old breeder hens. *Poultry Science*. 2011; 90(11): 2648–2655. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01415>
14. Fathi M., Abou-Emera O., Al-Homidan I., Galal A., Rayan G. Effect of genotype and egg weight on hatchability properties and embryonic mortality pattern of native chicken populations. *Poultry Science*. 2022; 101(11): 102129. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102129>
15. Шаповалов С.О., Бурыков Н.П., Корнилова Е.В., Жевнеров А.В., Алтухов Т.Д., Аникина Д.С. Мониторинг качества инкубационного яйца мясных кроссов импортного и отечественного производства. *Аграрная наука*. 2024; (12): 89–97. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-89-97>
16. Ni A. *et al.* Genetic parameters, reciprocal cross differences, and age-related heterosis of egg-laying performance in chickens. *Genetics Selection Evolution*. 2023; 55: 87. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00862-7>
17. Fu M. *et al.* Genome-Wide Association Study of Egg Production Traits in Shuanglian Chickens Using Whole Genome Sequencing. *Genes*. 2023; 14(12): 2129. <https://doi.org/10.3390/genes14122129>
18. Lordelo M., Cid J., Cordovil C.M.D.S., Alves S.P., Bessa R.J.B., Carolino I. A comparison between the quality of eggs from indigenous chicken breeds and that from commercial layers. *Poultry Science*. 2020; 99(3): 1768–1776. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.023>
19. Grela E.R., Knaga S., Winiarska-Mieczan A., Zięba G. Effects of dietary alfalfa protein concentrate supplementation on performance, egg quality, and fatty acid composition of raw, freeze-dried, and hard-boiled eggs from Polbar laying hens. *Poultry Science*. 2020; 99: 2256–2265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.030>
20. Ketta M., Tümová E. Eggshell structure, measurements, and quality-affecting factors in laying hens: a review. *Czech Journal of Animal Science*. 2016; 61(7): 299–309. <https://doi.org/10.17221/46/2015-CJAS>
5. Tyumentseva V.S., Popov P.A., Babunova V.S., Savinova E.P., Osipova I.S. Bacterial contamination of commercial chicken eggs. *Agrarian science*. 2025; (4): 63–68 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-63-68>
6. Gvozdeva Yu.M. Exterior and interior markers of potential poultry productivity. *Modern vectors of scientific development. Collection of articles based on the materials of the annual scientific and practical conference of teachers on the results of research for 2023*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 267–268 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/brrpbe>
7. Buyarov A.V., Vorontsova E.V. Production of eggs and poultry meat: trends, problems, development prospects. *Actual problems of veterinary science and intensive animal husbandry: Collection of papers of the international scientific and practical conference*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2024; 29–36 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ibsttf>
8. Chomchuen K., Tuntiyasawadikul V., Chankitisakul V., Boonkum W. Genetic Evaluation of Body Weights and Egg Production Traits Using a Multi-Trait Animal Model and Selection Index in Thai Native Synthetic Chickens (Kaimook e-san2). *Animals*. 2022; 12(3): 335. <https://doi.org/10.3390/ani12030335>
9. Obozhina E.P., Chepushtanova O.V. Egg production of agricultural poultry. *Priority areas for the development of agricultural science and technology. Collection of abstracts of the scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Faculty of Biotechnology and Food Engineering*. Ekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 290–291 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/kxsonu>
10. Kavtarashvili A.Sh. Chicken egg. Part 2. Factors influencing egg weight. *Nashe sel'skoye khozyaystvo (Our agriculture)*. 2024; 16(336): 65–67 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/fjzwxu>
11. Losevskaya S.A., Ilyin V.G. Egg categories, their characteristics and storage methods. *Proceedings of the All-Russian (national) scientific and practical conference with international participation dedicated to the 110th anniversary of the birth of I.S. Kaurichev. Conference materials*. Kaluga: individual entrepreneur Yakunina V.A. 2024; 59–61 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/cjpxjh>
12. Arzhankova Yu.V., Prirezova E.A. Comparative assessment of chicken eggs of different categories. *Current state and innovative ways of development of the agro-industrial complex in the Russian Federation. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the Day of Science*. Velikiye Luki: Velikiye Luki State Agricultural Academy. 2025; 9–15 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/cjqrbf>
13. Nangsuay A., Ruangpanit Y., Meijerhof R., Attamangkune S. Yolk absorption and embryo development of small and large eggs originating from young and old breeder hens. *Poultry Science*. 2011; 90(11): 2648–2655. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01415>
14. Fathi M., Abou-Emera O., Al-Homidan I., Galal A., Rayan G. Effect of genotype and egg weight on hatchability properties and embryonic mortality pattern of native chicken populations. *Poultry Science*. 2022; 101(11): 102129. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102129>
15. Shapovalov S.O., Buryakov N.P., Kornilova E.V., Zhevnerov A.V., Altukhov T.D., Anikina D.S. Monitoring the quality of incubation eggs of meat crosses of imported and domestic production. *Agrarian science*. 2024; (12): 89–97 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-89-97>
16. Ni A. *et al.* Genetic parameters, reciprocal cross differences, and age-related heterosis of egg-laying performance in chickens. *Genetics Selection Evolution*. 2023; 55: 87. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00862-7>
17. Fu M. *et al.* Genome-Wide Association Study of Egg Production Traits in Shuanglian Chickens Using Whole Genome Sequencing. *Genes*. 2023; 14(12): 2129. <https://doi.org/10.3390/genes14122129>
18. Lordelo M., Cid J., Cordovil C.M.D.S., Alves S.P., Bessa R.J.B., Carolino I. A comparison between the quality of eggs from indigenous chicken breeds and that from commercial layers. *Poultry Science*. 2020; 99(3): 1768–1776. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.023>
19. Grela E.R., Knaga S., Winiarska-Mieczan A., Zięba G. Effects of dietary alfalfa protein concentrate supplementation on performance, egg quality, and fatty acid composition of raw, freeze-dried, and hard-boiled eggs from Polbar laying hens. *Poultry Science*. 2020; 99: 2256–2265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.030>
20. Ketta M., Tümová E. Eggshell structure, measurements, and quality-affecting factors in laying hens: a review. *Czech Journal of Animal Science*. 2016; 61(7): 299–309. <https://doi.org/10.17221/46/2015-CJAS>

21. Rizzi C. A Study on Egg Production and Quality According to the Age of Four Italian Chicken Dual-Purpose Purebred Hens Reared Outdoors. *Animals*. 2023; 13(19): 3064. <https://doi.org/10.3390/ani13193064>
22. Gao J. *et al.* Genome-Wide Association Study of Egg-Laying Traits and Egg Quality in LingKun Chickens. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 877739. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.877739>
23. Haqani M.I. *et al.* Quantitative trait loci for growth-related traits in Japanese quail (*Coturnix japonica*) using restriction-site associated DNA sequencing. *Molecular Genetics and Genomics*. 2021; 296(5): 1147–1159. <https://doi.org/10.1007/s00438-021-01806-w>
24. Schreweis M.A., Hester P.Y., Settar P., Moody D.E. Identification of quantitative trait loci associated with egg quality, egg production, and body weight in an F2 resource population of chickens. *Animal Genetics*. 2006; 37(2): 106–112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2005.01394.x>
25. Aslam M.L., Bastiaansen J.W.M., Crooijmans R.P.M.A., Vereijken A., Groenen M.A.M. Whole genome QTL mapping for growth, meat quality and breast meat yield traits in turkey. *BMC Genetics*. 2011; 12: 61. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-12-61>
26. Liao R. *et al.* Genome-wide association study reveals novel variants for growth and egg traits in Dongxiang blue-shelled and White Leghorn chickens. *Animal Genetics*. 2016; 47(5): 588–596. <https://doi.org/10.1111/age.12456>
27. Jin C.F., Chen Y.J., Yang Z.Q., Shi K., Chen C.K. A genome-wide association study of growth trait-related single nucleotide polymorphisms in Chinese Yancheng chickens. *Genetics and Molecular Research*. 2015; 14(4): 15783–15792.
28. Wolc A. *et al.* Genetic parameters of egg defects and egg quality in layer chickens. *Poultry Science*. 2012; 91(6): 1292–1298. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-02130>

ОБ АВТОРАХ

Наталья Александровна Волкова

доктор биологических наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории криобиологии
natavolkova@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7191-3550>

Анастасия Николаевна Ветох

научный сотрудник лаборатории криобиологии
anastezuya@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2865-5960>

Людмила Александровна Волкова

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории микробиологии
ludavolkova@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9407-3686>

Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, Подольск, Московская обл., 142132, Россия

21. Rizzi C. A Study on Egg Production and Quality According to the Age of Four Italian Chicken Dual-Purpose Purebred Hens Reared Outdoors. *Animals*. 2023; 13(19): 3064. <https://doi.org/10.3390/ani13193064>
22. Gao J. *et al.* Genome-Wide Association Study of Egg-Laying Traits and Egg Quality in LingKun Chickens. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 877739. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.877739>
23. Haqani M.I. *et al.* Quantitative trait loci for growth-related traits in Japanese quail (*Coturnix japonica*) using restriction-site associated DNA sequencing. *Molecular Genetics and Genomics*. 2021; 296(5): 1147–1159. <https://doi.org/10.1007/s00438-021-01806-w>
24. Schreweis M.A., Hester P.Y., Settar P., Moody D.E. Identification of quantitative trait loci associated with egg quality, egg production, and body weight in an F2 resource population of chickens. *Animal Genetics*. 2006; 37(2): 106–112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2005.01394.x>
25. Aslam M.L., Bastiaansen J.W.M., Crooijmans R.P.M.A., Vereijken A., Groenen M.A.M. Whole genome QTL mapping for growth, meat quality and breast meat yield traits in turkey. *BMC Genetics*. 2011; 12: 61. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-12-61>
26. Liao R. *et al.* Genome-wide association study reveals novel variants for growth and egg traits in Dongxiang blue-shelled and White Leghorn chickens. *Animal Genetics*. 2016; 47(5): 588–596. <https://doi.org/10.1111/age.12456>
27. Jin C.F., Chen Y.J., Yang Z.Q., Shi K., Chen C.K. A genome-wide association study of growth trait-related single nucleotide polymorphisms in Chinese Yancheng chickens. *Genetics and Molecular Research*. 2015; 14(4): 15783–15792.
28. Wolc A. *et al.* Genetic parameters of egg defects and egg quality in layer chickens. *Poultry Science*. 2012; 91(6): 1292–1298. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-02130>

ABOUT THE AUTHORS:

Natalia Alexandrovna Volkova

Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Head of the Cryobiology Laboratory
natavolkova@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7191-3550>

Anastasia Nikolaevna Vetokh

Researcher at the Cryobiology Laboratory
anastezuya@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2865-5960>

Ludmila Alexandrovna Volkova

Candidate of Biological Sciences, Researcher of the Microbiology Laboratory
ludavolkova@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9407-3686>

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, Russia

С.С. Белокурова ✉

Р.Ю. Чинаров

В.А. Луканина

Г.Н. Сингина

Федеральный исследовательский
центр животноводства — ВИЖ
им. академика Л.К. Эрнста,
Подольск, Московская обл., Россия

✉ socialabs@mail.ru

Поступила в редакцию: 20.06.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Белокурова С.С., Чинаров Р.Ю.,
Луканина В.А., Сингина Г.Н.

Sofia S. Belokurova ✉

Roman Yu. Chinarov

Viktoria A. Lukanina

Galina N. Singina

L.K. Ernst Federal Research Center for
Animal Husbandry, Podolsk, Moscow
region, Russia

✉ socialabs@mail.ru

Received by the editorial office: 20.06.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Belokurova S.S., Chinarov R.Yu.,
Lukanina V.A., Singina G.N.

Влияние различных временных режимов проведения сеансов ОПУ на развитие овариальных фолликулов у тёлочек сычёвской породы

РЕЗЮМЕ

С учетом влияния большого количества факторов на результативность трансвагинальной УЗИ-ассистированной аспирации овариальных фолликулов (ОПУ), среди которых породные и индивидуальные особенности животных, необходим подбор оптимальных режимов проведения ОПУ для разных пород крупного рогатого скота. Стоит отметить, что особенно актуальным является изучение параметров, влияющих на проведение технологии ОПУ/ИВР, в рамках создания криобанков эмбрионов отечественных пород крупного рогатого скота, так как они имеют ограниченную численность. Данное исследование было проведено в ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста на тёлках сычёвской породы, признанной генофондной.

Цель работы — изучение влияния кратности проведения сеансов ОПУ (1 или 2 раза в неделю) на паттерн развития овариальных фолликулов во взаимосвязи с количеством и качеством извлекаемых ооцитов.

В ходе исследования было установлено, что при уменьшении интервала между сеансами ОПУ с 7 до 3–4 суток происходило увеличение (на 73,8%) числа аспирированных фолликулов среднего размера с одновременным уменьшением числа и доли дегенерированных ооцитов. Так, в группе, подвергающейся ОПУ дважды в неделю, доля пригодных ооцитов составляла 62,8% против 53,3% в группе, в которой сеансы проводили один раз в неделю. При этом доля аспирированных фолликулов от общего числа УЗИ-видимых фолликулов между группами не различалась (78,6% против 78,4%). С учетом полученных результатов оптимальным режимом проведения сеансов ОПУ на тёлках сычёвской породы было принято считать проведение процедуры два раза в неделю.

Ключевые слова: вспомогательные репродуктивные технологии, ОПУ, сычевская порода, УЗИ, ооцит-кумуляусные комплексы, размер фолликулов, тёлки-доноры

Для цитирования: Белокурова С.С., Чинаров Р.Ю., Луканина В.А., Сингина Г.Н. Влияние различных временных режимов проведения сеансов ОПУ на развитие овариальных фолликулов у тёлочек сычёвской породы. *Аграрная наука*. 2025; 400 (11): 76–82. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-76-82>

The influence of different time modes of OPU sessions on the development of ovarian follicles in heifers of the Sychev breed

ABSTRACT

Since the effectiveness of OPU is influenced by a large number of factors, including the breed and individual characteristics of animals, it is necessary to select the optimal OPU modes for different breeds of cattle. It is worth noting that it is particularly relevant to study the factors affecting the effectiveness of OPU/IVP in the framework of creating cryobanks of embryos of domestic cattle breeds, since they have a limited number. This study was conducted at the L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry on heifers of the Sychev breed recognized by the gene pool.

The aim of the work was to study the effect of the frequency of OPU sessions (1 or 2 times a week) on the pattern of ovarian follicle development in relation to the quantity and quality of extracted oocytes.

During the study, it was found that with a decrease in the interval between OPU sessions from 7 to 3–4 days, there was an increase in the number of medium-sized aspirated follicles (by 73.8%) with a simultaneous decrease in the number and proportion of degenerated oocytes. Thus, in the group undergoing OPU twice a week, the proportion of usable oocytes was 62.8% versus 53.3% in the group in which the sessions were performed once a week. At the same time, the proportion of aspirated follicles from the total number of ultrasound-visible follicles did not differ between the groups (78.6% versus 78.4%). Taking into account the results obtained, the optimal mode of conducting OPU sessions on Sychev heifers was considered to be twice a week.

Key words: assisted reproductive technologies, OPU, Sychev breed, ultrasound, cumulus-oocyte complexes, follicle size, donor-heifers

For citation: Belokurova S.S., Chinarov R.Yu., Lukanina V.A., Singina G.N. The influence of different time modes of OPU sessions on the development of ovarian follicles in heifers of the Sychev breed. *Agrarian science*. 2025; 400 (11): 76–82 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-76-82>

Введение/Introduction

Первая трансвагинальная пункция фолликулов яйчников под ультразвуковым контролем (Ovum Pick-Up, OPU) у крупного рогатого скота была проведена в 1988 году, после чего было предпринято множество попыток повысить эффективность этого метода [1]. На сегодняшний день в скотоводстве OPU — это ключевой источник получения ооцит-кумулюсных комплексов (ОКК) для производства эмбрионов *in vitro* (*in vitro* produced, IVP) во всём мире [2–3]. Стоит отметить, что OPU/IVP постепенно вытесняет Multiple Ovulation Embryo Transfer (MOET) — традиционную технологию трансплантации эмбрионов *in vivo* (*in vivo* derived, IVD), вымываемых у коров после суперовуляции и искусственного осеменения [4–7].

Так, согласно данным по производству эмбрионов крупного рогатого скота во всём мире, в 2015 году количество эмбрионов *in vitro* впервые превзошло число получаемых эмбрионов *in vivo* и с тех пор продолжает расти. Проведение большого количества исследований, направленных на повышение результативности OPU/IVP, является определяющим фактором массового использования этой технологии в коммерческом производстве эмбрионов *in vitro*. К примеру, по данным за 2023 год в США, количество IVP-эмбрионов крупного рогатого скота приблизилось к 1 млн (968 043), что более чем в два раза превысило число, зарегистрированное в Бразилии. Среди европейских стран с наиболее высокими показателями в производстве эмбрионов (более 5000 в 2023 г.) были выделены Франция, Нидерланды и Великобритания [8].

По установленным данным, среди факторов, отражающихся на результативности OPU, было обнаружено влияние породных и индивидуальных особенностей доноров, включающих возраст, гормональный статус, индивидуальную реакцию, стадию полового цикла и количество антральных фолликулов в яйчниках [9–13].

Следует отметить, что оптимальный размер фолликулов, являющийся основным элементом в отношении отбора компетентных ооцитов при проведении трансвагинальной пункции [14], зависит от породы, физиологического состояния животных, протокола гормональной синхронизации полового цикла и частоты проведения OPU [15–17]. Поэтому особую актуальность в повышении результативности технологии OPU/IVP приобретает изучение фолликулогенеза в отношении количественных и качественных характеристик ооцитов при разной частоте проведения сеансов OPU у различных пород крупного рогатого скота. Подобные исследования особенно важны для отечественных пород, имеющих ограниченную численность, ведь развитие вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ), в частности OPU/IVP, способствует увеличению

числа потомков от генетически ценных особей, тем самым увеличивая темпы генетического прогресса в селекции пород крупного рогатого скота и повышая эффективность программ по сохранению генофондных пород [18].

Сычёвская порода является отечественной породой крупного рогатого скота, численность поголовья которой, по данным Всемирной продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО)¹, относится к «критической» категории риска [19]. Выполненное ранее исследование эффективности различных временных режимов проведения сеансов OPU на тёлках сычёвской породы не выявило значительного различия во влиянии кратности сеансов (один или два раза в неделю) на количество и качество полученных ооцитов [20].

Стоит отметить, что сравнительный анализ проводился на основании оценки данных, полученных в начале эксперимента. На сегодняшний день на тёлках сычёвской породы полностью проведена запланированная серия последовательных сеансов трансвагинальной пункции фолликулов под ультразвуковым контролем, что позволяет провести более детальное исследование влияния различных интервалов между сеансами OPU на развитие овариальных фолликулов у тёлок сычёвской породы во взаимосвязи с количественными и качественными характеристиками извлеченных ооцитов.

Цель исследования — изучение влияния различной частоты проведения сеансов OPU (один или два раза в неделю) на паттерн развития овариальных фолликулов у тёлок сычёвской породы во взаимосвязи с количественными и качественными характеристиками извлекаемых ооцит-кумулюсных комплексов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили на тёлках сычёвской породы ($n = 8$) в возрасте 23–24 месяцев. Животные имели нормальную упитанность. Содержались беспривязно в условиях экспериментальной фермы ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Материалом исследования явились ультразвукографические изображения яйчников тёлок сычёвской породы, полученные при проведении серии последовательных сеансов трансвагинальной пункции овариальных фолликулов, а также ооцит-кумулюсные комплексы, извлеченные в ходе аспирации. Метод исследования — проведение трансвагинальной пункции овариальных фолликулов под ультразвуковым контролем с последующим анализом полученных ультразвукографических изображений яйчников тёлок сычёвской породы, а также оценки количественных и качественных характеристик ооцитов.

¹ <https://www.fao.org/home/ru>

В начале эксперимента тёлкам проводили гормональную синхронизацию полового цикла. Так, в день прихода тёлки в охоту применили препарат «Ферголин» (ООО «НИТА-ФАРМ», Россия) в дозе 2,5 мл на голову, действующее вещество гонадотропин релизинг-гормон (ГнРГ). За девять дней до прихода тёлки в охоту использовали тот же препарат в дозе 5 мл на голову, а за два дня до прихода тёлки в охоту — «Регостенон» (ООО «НИТА-ФАРМ», Россия) в дозе 3 мл на голову, действующее вещество простагландин F₂ (ПГФ₂). На четвертый день полового цикла тёлкам провели первый сеанс ОРУ.

В зависимости от частоты проведения сеансов трансвагинальной аспирации тёлки были разделены на две группы. Первая группа (n = 4) подвергалась ОРУ дважды в неделю, для каждого донора были проведены 10 сеансов. Во второй группе (n = 4) трансвагинальную пункцию фолликулов проводили один раз в неделю, количество сеансов для каждой тёлки — 5. Интервал по отношению к предыдущему дню проведения ОРУ в группах составил, соответственно, 3–4 и 7 суток.

Пункцию фолликулов осуществляли с помощью системы для ОРУ у крупного рогатого скота (Minitube, Германия), в комплект которой входили ультразвуковой сканер Versana Active (GE Healthcare, США), ультразвуковой секторный зонд с частотой 5 МГц (Aloka UST-9111-5, 5 МГц/90°/14 мм) с держателем, а также вакуумный насос для аспирации фолликулов и забора ооцитов. В экспериментальных группах определяли количество, процентное распределение и размер фолликулов, количество и качество полученных ооцит-кумулюсных комплексов и степень их извлечения.

Измерение фолликулов проводили в программе для просмотра и анализа медицинских изображений стандарта DICOM Vidar Dicom Viewer (ООО «ПО ВИДАР», Россия). Фолликулы классифицировались в зависимости от размера: на малые (диаметр менее 4 мм), средние (диаметр от 4 до 8 мм) и большие (диаметр 8 мм и более). Для поиска ооцитов использовали стереомикроскоп (Nikon, Япония).

По результатам оценки морфологических характеристик извлеченные ооциты [21] делили на три класса: хорошие, средние, дегенерированные.

Для статистической обработки данных использовали Microsoft Excel (Microsoft, США). Для определения достоверности выявленных различий между группами проводили расчет непараметрического критерия Манна — Уитни² для двух независимых выборок. Минимальный порог достоверности был установлен на уровне $p < 0,05$. Для лучшей интерпретации полученных значений проводили расчет средних значений и стандартных ошибок.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В ходе исследования не было выявлено статистически достоверных различий между двумя группами в отношении количества фолликулов, визуализируемых в среднем у одного донора за сессию ($12,15 \pm 0,73$ против $11,1 \pm 1,19$ фолликулов соответственно, $p > 0,05$).

Из данных, приведенных на рисунке 1, наблюдалось увеличение (на 69,8%) числа УЗИ-видимых фолликулов среднего размера при сокращении интервала между сеансами ОРУ с 7 до 3–4 суток (с 3,15 до 5,35 фолликулов соответственно, $p < 0,05$ и $p < 0,01$).

При этом во второй группе, подвергающейся трансвагинальной пункции фолликулов один раз в неделю, было отмечено повышение (на 19,1%) среднего числа фолликулов малого размера по сравнению с первой группой (с 5,75 до 6,85 фолликулов соответственно, $p > 0,05$).

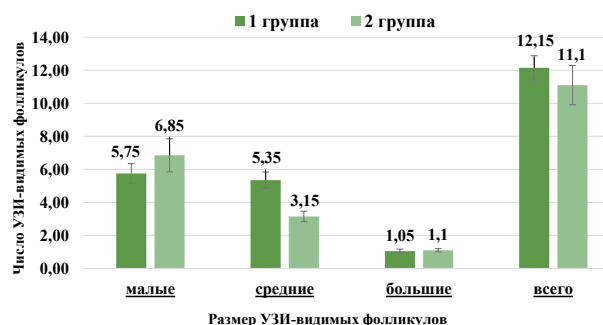
Доля аспирированных фолликулов от общего числа УЗИ-видимых фолликулов между группами не различалась. Она составила 78,6% в первой группе и 78,4% — во второй.

При анализе количества фолликулов, пунктированных в среднем у одной тёлки-донора за сессию, отмечалось увеличение (на 73,8%) числа фолликулов среднего размера в группе с интервалом 3–4 суток между сеансами ОРУ по сравнению с группой, в которой аспирацию фолликулов проводили один раз в неделю (с 2,95 до 5,13 фолликулов соответственно, $p < 0,05$ и $p < 0,01$). Разница в количестве фолликулов большого размера была незначительной ($p > 0,05$). В это же время в первой группе наблюдалось уменьшение числа фолликулов малого размера (на 27,3%) по сравнению со второй группой (с 4,65 до 3,38 фолликулов соответственно, $p < 0,05$). Это могло быть объяснено тем, что во второй группе у одной из тёлки среднее количество аспирированных фолликулов

Рис. 1. Количество овариальных фолликулов, УЗИ-визуализируемое в среднем за сессию у одной тёлки сычёвской породы

Fig. 1. The number of ovarian follicles, ultrasound-visualized on average per session in one heifer of the Sychev breed

Примечание: в качестве пределов погрешностей указаны значения стандартной ошибки.



² <https://medstatistic.ru/methods/methods2.html>

малого размера на одну сессию OPU имело наибольшее значение ($13 \pm 1,67$ фолликула) и было выше, чем у остальных доноров, используемых в эксперименте ($p < 0,05$) (рис. 2).

Была проведена сравнительная оценка количества аспирированных и неаспирированных фолликулов яичников по классам в зависимости от частоты проведения сеансов OPU (рис. 3).

Так, среди неаспирированных больше всего наблюдались фолликулы малого размера: 2,38 фолликула в первой группе и 2,20 — во второй ($p > 0,05$), что составило, соответственно, 91,3% и 91,7% от общего числа фолликулов в этих группах доноров. Количество и доля неаспирированных фолликулов среднего размера между группами различались незначительно — 0,23 (8,7%) и 0,20 (8,3%) ($p > 0,05$). Как уже было отмечено ранее, большее количество пункций в первой группе с интервалом 4 суток между сеансами OPU приходилось на фолликулы среднего размера — 5,13 (53,7% от общего количества аспирированных фолликулов), что согласуется с результатами исследования, проведенного на другой породе крупного рогатого скота [22]. При этом меньше всего было аспирировано фолликулов большого размера — 1,05 (11,0%). Во второй группе с интервалом 7 суток между сеансами OPU больше всего аспираций приходилось на фолликулы малого размера — 4,65 (53,4%), меньше всего было пунктировано фолликулов большого размера — 1,10 (12,6%) (рис. 4).

Данные, полученные в результате измерений аспирированных фолликулов яичников тёлочек сычёвской породы, представлены в таблице 1.

Так, при увеличении частоты проведения сеансов OPU наблюдалось снижение диаметра фолликулов большого размера — с 11,9 до 9,8 мм. Это связано с тем, что на 5 начиналась стадия селекции доминантного фолликула. При этом при проведении аспираций дважды в неделю доминантный фолликул не успевал развиваться, и выделявшаяся когорта фолликулов находилась в промежуточной стадии роста, о чем свидетельствовало большое количество фолликулов среднего размера, визуализируемое в первой группе тёлочек-доноров.

Развитие доминантного фолликула при проведении сеансов OPU один раз в неделю, по-видимому, вызвало атрезию остальных фолликулов, что сказалось на качественных характеристиках извлекаемых ооцит-кумулюсных комплексов. Так, в первой группе доля пригодных ооцитов составила 62,8% при извлечении 59,2% против 53,3% при извлечении 60,3% во второй группе (рис. 5).

Проведенный анализ количества и процентного распределения ооцитов разных классов показал, что при сокращении интервала между сеансами OPU с 7 до 3–4 суток происходило снижение числа дегенерированных ооцитов в 1,2 раза в среднем с 2,45 до 2,1 ооцита ($p > 0,05$), что согласуется

Рис. 2. Количество овариальных фолликулов, аспирированных в среднем у одного донора за сессию OPU

Fig. 2. The number of ovarian follicles aspirated from an average donor per OPU session

Примечание: в качестве пределов погрешностей указаны значения стандартной ошибки.

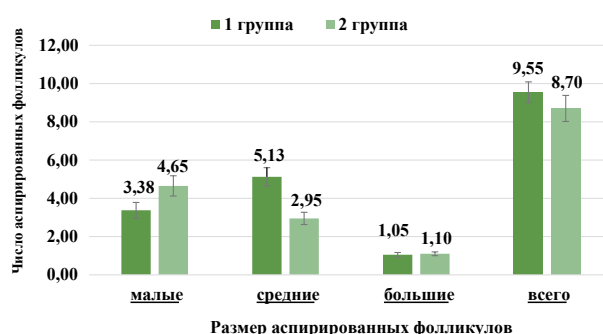


Рис. 3. Количество аспирированных и неаспирированных фолликулов яичников тёлочек сычёвской породы

Fig. 3. The number of aspirated and non-aspirated ovarian follicles of heifers of the Sychev breed

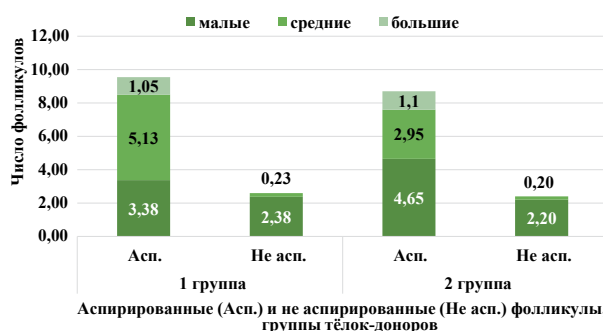


Рис. 4. Процентное распределение аспирированных и неаспирированных фолликулов яичников по классам в зависимости от размера

Fig. 4. Percentage distribution of aspirated and non-aspirated ovarian follicles by class depending on size

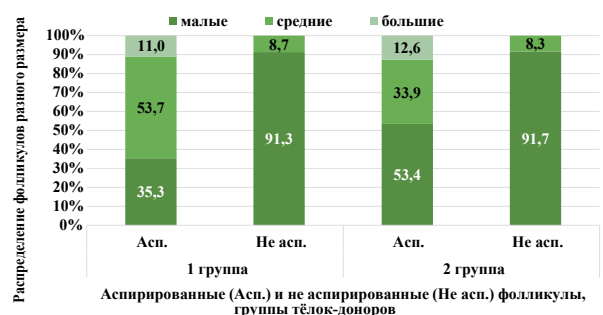


Таблица 1. Размеры аспирированных фолликулов разных классов

Table 1. Sizes of aspirated follicles of different classes

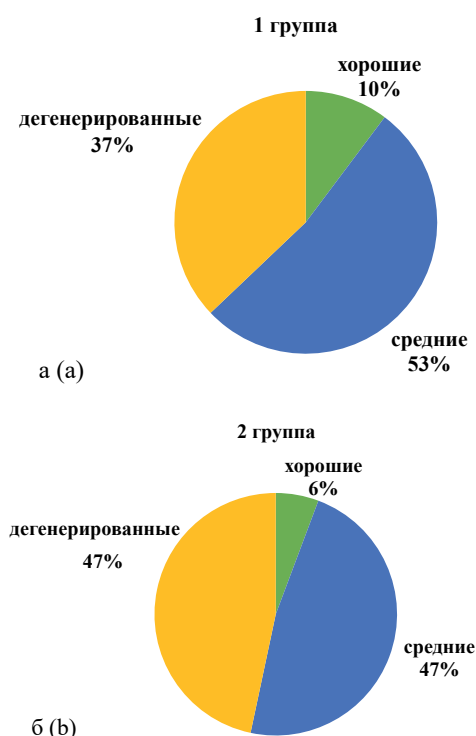
№ группы (частота сеансов)	Показатель	Размеры фолликулов разных классов / (M ± m)		
		малые	средние	большие
1-я группа (2 раза в неделю)	Площадь, мм ²	7,9±0,2	21,9±0,6	75,2±5,0
	Диаметр, мм	3,2±0,0	5,3±0,1	9,8±0,3
2-я группа (1 раз в неделю)	Площадь, мм ²	7,6±0,2	21,6±1,4	110,7±6,9
	Диаметр, мм	3,2±0,0	5,3±0,2	11,9±0,4

Примечание: M — среднее значение; m — стандартная ошибка.

Note: M — average value; m — standard error.

Рис. 5. Процентное распределение ооцит-кумулюсных комплексов разных классов: а — 1-я группа, б — 2-я группа

Fig. 5. Percentage distribution of oocyte-cumulus complexes of different classes: а — group 1, b — group 2



с результатами других авторов [22, 23]. В первой группе было извлечено в 1,9 раза больше ооцитов хорошего качества и в 1,2 раза больше ооцитов среднего качества по сравнению со второй группой ($p > 0,05$) (рис. 6).

При этом не было выявлено значительного различия во влиянии временных режимов проведения ОРУ на общее количество ооцитов, извлеченных в среднем у одного донора за сессию.

Выводы/Conclusions

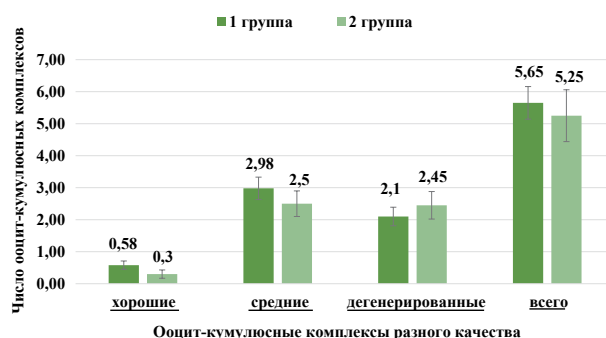
В результате проведенного исследования на телках сычëвской породы не было выявлено заметного влияния кратности сессий ОРУ (один или два раза в неделю) на количество фолликулов, УЗИ-визуализируемых и аспирированных в среднем у одного донора за сессию. Так, доля аспирированных фолликулов от общего числа УЗИ-видимых фолликулов между группами

Рис. 6. Количество ооцит-кумулюсных комплексов разных классов

Fig. 6. The number of cumulus-oocyte complexes of different classes

Примечание: в качестве пределов погрешностей указаны значения стандартной ошибки.

Note: the standard error values are indicated as the error limits.



составила 78,6% против 78,4% соответственно. При этом было обнаружено достоверное увеличение (на 73,8%) числа фолликулов среднего размера в первой группе с интервалом 3–4 суток между сеансами ОРУ по сравнению со второй группой, подвергающейся ОРУ один раз в неделю.

Полученные данные о размерах аспирированных фолликулов в двух группах доноров могут свидетельствовать о том, что проведение последовательных сеансов трансвагинальной аспирации фолликулов в режиме дважды в неделю способствует увеличению частоты фолликулярных волн, тем самым препятствуя развитию доминантного фолликула и, соответственно, атрезии остальных фолликулов.

При увеличении кратности сеансов ОРУ когорта фолликулов находится в промежуточной стадии роста, что оказывает положительное влияние на качественные характеристики ооцитов. Так, в первой группе доноров наблюдались меньшая степень дегенерации и большая доля ооцитов пригодного качества по сравнению со второй группой.

С учетом результатов исследования оптимальным режимом проведения сеансов ОРУ на телках сычëвской породы следует считать проведение процедуры два раза в неделю.

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 Минобрнауки России (соглашение № 075-02-2025-1585).

FUNDING

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russia (agreement No. 075-02-2025-1585).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pieterse M.C, Kappen K.A., Kruip T.A.M., Taverne M.A.M. Aspiration of bovine oocytes during transvaginal ultrasound scanning of the ovaries. *Theriogenology*. 1988; 30(4): 751–762. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(88\)90310-X](https://doi.org/10.1016/0093-691X(88)90310-X)

REFERENCES

1. Pieterse M.C, Kappen K.A., Kruip T.A.M., Taverne M.A.M. Aspiration of bovine oocytes during transvaginal ultrasound scanning of the ovaries. *Theriogenology*. 1988; 30(4): 751–762. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(88\)90310-X](https://doi.org/10.1016/0093-691X(88)90310-X)

2. Чинаров Р.Ю. Развитие технологии прижизненного получения ооцитов у коров: современное состояние и направления исследований (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2024; 59(2): 194–220.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.2.194rus>
3. Ferré L.B. *et al.* Transvaginal ultrasound-guided oocyte retrieval in cattle: State-of-the-art and its impact on the *in vitro* fertilization embryo production outcome. *Reproduction in Domestic Animals*. 2023; 58(3): 363–378.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/rda.14303>
4. Белокурова С.С., Чинаров Р.Ю. Сравнительная оценка получения эмбрионов *in vitro* и *in vivo*. *Производство и переработка сельскохозяйственной продукции. Материалы X Международной научно-практической конференции*. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет. 2024; 31–35.
<https://elibrary.ru/gqspppt>
5. Ealy A.D., Wooldridge L.K., McCoski S.R. Board invited review: Post-transfer consequences of *in vitro*-produced embryos in cattle. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(6): 2555–2568.
<https://doi.org/10.1093/jas/skz116>
6. Sirard M.-A. 40 years of bovine IVF in the new genomic selection context. *Reproduction*. 2018; 156(1): R1–R7.
<https://doi.org/10.1530/REP-18-0008>
7. Watanabe Y.F. *et al.* Number of oocytes retrieved per donor during OPU and its relationship with *in vitro* embryo production and field fertility following embryo transfer. *Animal Reproduction*. 2017; 14(3): 635–644.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1008>
8. Viana J.H.M. 2023 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2024; 42(4): 33–46.
9. Baruselli P.S. *et al.* Factors that interfere with oocyte quality for *in vitro* production of cattle embryos: effects of different developmental & reproductive stages. *Animal Reproduction*. 2016; 31(3): 264–272.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR861>
10. Garcia S.M. *et al.* Synchronization of stage of follicle development before OPU improves embryo production in cows with large antral follicle counts. *Animal Reproduction Science*. 2020; 221: 106601.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106601>
11. Presicce G.A. *et al.* Efficacy of repeated ovum pick-up in Podolic cattle for preservation strategies: a pilot study. *Italian Journal of Animal Science*. 2020; 19(1): 31–40.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1684213>
12. Sakaguchi K., Yanagawa Y., Yoshioka K., Suda T., Katagiri S., Nagano M. Relationships between the antral follicle count, steroidogenesis, and secretion of follicle-stimulating hormone and anti-Müllerian hormone during follicular growth in cattle. *Reproductive biology and endocrinology*. 2019; 17: 88.
<https://doi.org/10.1186/s12958-019-0534-3>
13. Sartori R., Gimenes L.U., Monteiro P.L.J. Jr, Melo L.F., Baruselli P.S., Bastos M.R. Metabolic and endocrine differences between *Bos taurus* and *Bos indicus* females that impact the interaction of nutrition with reproduction. *Theriogenology*. 2016; 86(1): 32–40.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.016>
14. Benedetti C. *et al.* Effect of follicle characteristics on bovine *in vitro* embryo development. *Reproduction, Fertility, and Development*. 2021; 34(2): 307–308.
<https://doi.org/10.1071/RDv34n2Ab139>
15. Bó G.A., Cedeño A., Mapletoft R.J. Strategies to increment *in vivo* and *in vitro* embryo production and transfer in cattle. *Animal Reproduction*. 2019; 16(3): 411–422.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2019-0042>
16. Ongaratto F.L., Cedeño A.V., Rodriguez-Villamil P., Tríbulo A., Bó G.A. Effect of FSH treatment on cumulus oocyte complex recovery by ovum pick up and *in vitro* embryo production in beef donor cows. *Animal Reproduction Science*. 2020; 214: 106274.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106274>
17. Seneda M.M., Zangirolamo A.F., Bergamo L.Z., Morotti F. Follicular wave synchronization prior to ovum pick-up. *Theriogenology*. 2020; 150: 180–185.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.024>
18. Ferré L.B., Kjelland M.E., Strøbech L.B., Hyttel P., Mermillod P., Ross P.J. Review: Recent advances in bovine *in vitro* embryo production: reproductive biotechnology history and methods. *Animal*. 2020; 14(5): 991–1004.
<https://doi.org/10.1017/S1751731119002775>
19. Багиров В.А., Зиновьева Н.А. Современное состояние и мировой опыт сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. *Успехи наук о животных*. 2024; (1): 5–24.
<https://elibrary.ru/hfwueh>
2. Chinarov R.Yu. Developing the Ovum Pick-Up technology in cattle: state-of-the-art and research directions (review). *Agricultural Biology*. 2024; 59(2): 194–220.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.2.194eng>
3. Ferré L.B. *et al.* Transvaginal ultrasound-guided oocyte retrieval in cattle: State-of-the-art and its impact on the *in vitro* fertilization embryo production outcome. *Reproduction in Domestic Animals*. 2023; 58(3): 363–378.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/rda.14303>
4. Belokurova S.S., Chinarov R.Yu. Comparative assessment of *in vitro* and *in vivo* embryo production. *Production and processing of agricultural products. Proceedings of the X International Scientific and practical conference*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University. 2024; 31–35 (in Russian).
<https://elibrary.ru/gqspppt>
5. Ealy A.D., Wooldridge L.K., McCoski S.R. Board invited review: Post-transfer consequences of *in vitro*-produced embryos in cattle. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(6): 2555–2568.
<https://doi.org/10.1093/jas/skz116>
6. Sirard M.-A. 40 years of bovine IVF in the new genomic selection context. *Reproduction*. 2018; 156(1): R1–R7.
<https://doi.org/10.1530/REP-18-0008>
7. Watanabe Y.F. *et al.* Number of oocytes retrieved per donor during OPU and its relationship with *in vitro* embryo production and field fertility following embryo transfer. *Animal Reproduction*. 2017; 14(3): 635–644.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1008>
8. Viana J.H.M. 2023 Statistics of embryo production and transfer in domestic farm animals. *Embryo Technology Newsletter*. 2024; 42(4): 33–46.
9. Baruselli P.S. *et al.* Factors that interfere with oocyte quality for *in vitro* production of cattle embryos: effects of different developmental & reproductive stages. *Animal Reproduction*. 2016; 31(3): 264–272.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR861>
10. Garcia S.M. *et al.* Synchronization of stage of follicle development before OPU improves embryo production in cows with large antral follicle counts. *Animal Reproduction Science*. 2020; 221: 106601.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106601>
11. Presicce G.A. *et al.* Efficacy of repeated ovum pick-up in Podolic cattle for preservation strategies: a pilot study. *Italian Journal of Animal Science*. 2020; 19(1): 31–40.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1684213>
12. Sakaguchi K., Yanagawa Y., Yoshioka K., Suda T., Katagiri S., Nagano M. Relationships between the antral follicle count, steroidogenesis, and secretion of follicle-stimulating hormone and anti-Müllerian hormone during follicular growth in cattle. *Reproductive biology and endocrinology*. 2019; 17: 88.
<https://doi.org/10.1186/s12958-019-0534-3>
13. Sartori R., Gimenes L.U., Monteiro P.L.J. Jr, Melo L.F., Baruselli P.S., Bastos M.R. Metabolic and endocrine differences between *Bos taurus* and *Bos indicus* females that impact the interaction of nutrition with reproduction. *Theriogenology*. 2016; 86(1): 32–40.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.016>
14. Benedetti C. *et al.* Effect of follicle characteristics on bovine *in vitro* embryo development. *Reproduction, Fertility, and Development*. 2021; 34(2): 307–308.
<https://doi.org/10.1071/RDv34n2Ab139>
15. Bó G.A., Cedeño A., Mapletoft R.J. Strategies to increment *in vivo* and *in vitro* embryo production and transfer in cattle. *Animal Reproduction*. 2019; 16(3): 411–422.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2019-0042>
16. Ongaratto F.L., Cedeño A.V., Rodriguez-Villamil P., Tríbulo A., Bó G.A. Effect of FSH treatment on cumulus oocyte complex recovery by ovum pick up and *in vitro* embryo production in beef donor cows. *Animal Reproduction Science*. 2020; 214: 106274.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106274>
17. Seneda M.M., Zangirolamo A.F., Bergamo L.Z., Morotti F. Follicular wave synchronization prior to ovum pick-up. *Theriogenology*. 2020; 150: 180–185.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.024>
18. Ferré L.B., Kjelland M.E., Strøbech L.B., Hyttel P., Mermillod P., Ross P.J. Review: Recent advances in bovine *in vitro* embryo production: reproductive biotechnology history and methods. *Animal*. 2020; 14(5): 991–1004.
<https://doi.org/10.1017/S1751731119002775>
19. Bagirov V.A., Zinovieva N.A. The current state and world experience in the conservation of genetic resources of farm animals. *Ernst Journal of Animal Science*. 2024; (1): 5–24 (in Russian).
<https://elibrary.ru/hfwueh>

20. Белокурова С.С., Чинаров Р.Ю., Сингина Г.Н. Оценка эффективности различных временных режимов проведения ОПУ у тёлочек сычевской породы. *Исследования молодых ученых в реализации приоритетов научно-технологического развития в области животноводства. Сборник тезисов докладов молодежной научной конференции*. Подольск: Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста. 2025; 34–35. <https://elibrary.ru/wyzdzc>

21. Сингина Г.Н., Чинаров Р.Ю., Шедова Е.Н. Влияние количества повторяющихся процедур ОПУ на эффективность получения *in vitro* эмбрионов у ярославской породы крупного рогатого скота. *Достижения науки и техники АПК*. 2023; 37(11): 59–64. <https://elibrary.ru/iowixw>

22. Saleem M., Yousuf M.R., Ghafoor A., Riaz A. Effect of three schemes of ovum pick-up on the follicular dynamics, gene expression, and in-vitro developmental competence of oocytes in Sahiwal cattle. *Reproduction in Domestic Animals*. 2022; 57(10): 1230–1243. <https://doi.org/10.1111/rda.14198>

23. Чинаров Р.Ю., Луканина В.А., Сингина Г.Н., Тарадайник Н.П. Результативность получения ооцитов коров при различных временных режимах трансвагинальной пункции фолликулов. *Достижения науки и техники АПК*. 2020; 34(2): 57–60. <https://elibrary.ru/koyvtv>

20. Belokurova S.S., Chinarov R.Yu., Singina G.N. Evaluation of the effectiveness of various time modes of OPU in heifers of the Sychev breed. *Research of young scientists in the implementation of priorities of scientific and technological development in the field of animal husbandry. Collection of abstracts of the youth scientific conference*. Podolsk: Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst. 2025; 34–35 (in Russian). <https://elibrary.ru/wyzdzc>

21. Singina G.N., Chinarov R.Yu., Shedova E.N. Effect of the number of repeated OPU procedures on the efficiency of *in vitro* embryo production in Yaroslavl breed of cattle. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2023; 37(11): 59–64 (in Russian). <https://elibrary.ru/iowixw>

22. Saleem M., Yousuf M.R., Ghafoor A., Riaz A. Effect of three schemes of ovum pick-up on the follicular dynamics, gene expression, and in-vitro developmental competence of oocytes in Sahiwal cattle. *Reproduction in Domestic Animals*. 2022; 57(10): 1230–1243. <https://doi.org/10.1111/rda.14198>

23. Chinarov R.Yu., Lukanina V.A., Singina G.N., Taradaynic N.P. The effectiveness of obtaining cows' oocytes at various time modes of transvaginal follicular puncture. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2020; 34(2): 57–60 (in Russian). <https://elibrary.ru/koyvtv>

ОБ АВТОРАХ

София Сергеевна Белокурова

аспирант
sofialabs@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2861-1834>

Роман Юрьевич Чинаров

кандидат ветеринарных наук,
старший научный сотрудник
roman_chinarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6511-5341>

Виктория Александровна Луканина

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
kristybatle@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4744-7873>

Галина Николаевна Сингина

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
g_singina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0198-9757>

Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, г. о. Подольск, Московская обл., 14213, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Sofia Sergeevna Belokurova

Graduate Student
sofialabs@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2861-1834>

Roman Yurievich Chinarov

Candidate of Veterinary Sciences,
Senior Researcher
roman_chinarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6511-5341>

Viktoria Alexandrovna Lukanina

Candidate of Biological Sciences,
Senior Researcher
kristybatle@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4744-7873>

Galina Nikolaevna Singina

Candidate of Biological Sciences,
Leading Researcher
g_singina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0198-9757>

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy settlement, Podolsk, Moscow region, 142132, Russia

УДК 636.082.11:636.088.31

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-83-90

К.М. Джуламанов

Н.П. Герасимов ✉

А.А. Сафронова

Федеральный научный центр
биологических систем и
агротехнологий Российской
академии наук, Оренбург, Россия

✉ nick.gerasimov@rambler.ru

Поступила в редакцию: 11.06.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Джуламанов К.М., Герасимов Н.П.,
Сафронова А.А.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-83-90

Kinispay M. Dzhuslamanov

Nikolay P. Gerasimov ✉

Alexandra A. Safronova

Federal Research Center for Biological
Systems and Agrotechnologies of
the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russia

✉ nick.gerasimov@rambler.ru

Received by the editorial office: 11.06.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Dzhuslamanov K.M., Gerasimov N.P.,
Safronova A.A.

Влияние полиморфизмов генов гормона роста и тиреоглобулина на морфологический состав туши и биоконверсию кормов в мясную продукцию у герефордских бычков

РЕЗЮМЕ

Развитие новых направлений в селекции мясного скота ориентировано на создание высокопродуктивных животных, способных к эффективному производству продукции при рациональном использовании протеина и энергии корма.

Цель работы — оценить влияние генотипа герефордских бычков по генам гормона роста и тиреоглобулина на морфологический состав туши и биоконверсию кормов в мясную продукцию.

Генотипированных по генам GH и TG5 герефордских бычков ($n = 9$) выращивали до 21-месячного возраста. Гомозиготные носители V-аллели гена GH за период выращивания потребили на 6,4% ($p = 0,09$) больше сырого протеина корма, что сопровождалось лучшим развитием мышечной ткани на 25,6 кг ($p < 0,05$) и скелета на 3,1 кг ($p < 0,05$) и меньшим содержанием жира на 6,4 кг ($p < 0,05$). У носителей LL-генотипа мякоть составляла 70,6% массы туши, что на 4,7–5,2% ($p < 0,05$) меньше сверстников с V-аллелем. Между гомозиготными генотипами по гену GH установлена значительная разница по расходу обменной энергии корма на 1 кг прироста на уровне 9,82 МДж ($p = 0,05$). У бычков с VV-вариантом гена GH 10% сырого протеина корма использовались на построение тканей тела, что на 0,9% ($p = 0,19$) превышало показатель LL-генотипа. Количество жира в туше значительно ($p < 0,05$) детерминировано генотипом молодняка по гену TG5. T-аллель ассоциировалась с интенсивным жиросложением, а C-аллель — с развитием мускулатуры. Генетические вариации по генам GH и TG5 могут быть использованы для улучшения эффективности разведения герефордского скота.

Ключевые слова: герефордские бычки, генотип, морфологический состав туши, сырой протеин, обменная энергия, конверсия, мясная продукция

Для цитирования: 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>

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

ABSTRACT

The development of new directions in beef cattle breeding is focused on the creation of highly productive animals capable of efficient meat production with rational use of feed protein and energy.

The aim of the work was to evaluate the effect of genotype by growth hormone and thyroglobulin genes on morphological composition of carcass and feed bioconversion into meat products in Hereford bulls. Hereford bulls genotyped for GH and TG5 genes ($n = 9$) were raised to 21 months of age. Homozygous carriers of the V allele of the GH gene consumed 6.4% ($p = 0.09$) more feed crude protein during the rearing period, accompanied by better muscle tissue development by 25.6 kg ($p < 0.05$) and skeletal development by 3.1 kg ($p < 0.05$), and lower fat content by 6.4 kg ($p < 0.05$). In LL-genotype carriers, lean accounted for 70.6% of carcass weight, which was 4.7–5.2% ($p < 0.05$) less than peers with the V allele. Between homozygous genotypes for GH gene there was a significant difference in feed metabolizable energy consumption per 1 kg of gain at the level of 9.82 MJ ($p = 0.05$). In bulls with VV-variant of GH gene 10% of feed crude protein was used for building body tissues, which was 0.9% ($p = 0.19$) higher than in LL-genotype. Carcass fat amount was significantly ($p < 0.05$) determined by the TG5 gene genotype of young animals. T allele was associated with intensive fat deposition and C allele with muscle development. Genetic variation in GH and TG5 genes can be used to improve the breeding efficiency of Hereford cattle.

Key words: Hereford bulls, genotype, morphological composition of the carcass, crude protein, metabolizable energy, bioconversion

For citation: Dzhuslamanov 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>

Введение/Introduction

Важнейшей биологической особенностью крупного рогатого скота является их способность потреблять и перерабатывать в ценные для человека продукты большое количество дешевых малопитательных кормов, включая отходы растениеводства и пищевой промышленности. Развитие новых направлений в селекции мясного скота ориентировано на создание высокопродуктивных животных, способных иметь большую живую массу в молодом возрасте и производить наибольшее количество питательных веществ при максимальном использовании протеина и энергии корма [1, 2].

Высокая продуктивность — это прежде всего генетически обусловленная способность организма эффективно трансформировать питательные вещества кормов в элементы тканей и органов, которые используются как продукты животноводства [3, 4]. Эта способность обусловлена интенсивным течением процессов обмена веществ в организме на всех уровнях — от использования энергии и питательных веществ кормов в желудочно-кишечном тракте до биосинтеза белка, липидов и других питательных веществ [5–7].

Сложный процесс переваривания питательных веществ корма с дальнейшим переносом их и включением в ткани животных никогда не прекращается в живом организме [8, 9]. Причем вновь поступившие вещества используются не только для формирования новых структур организма, но и для обновления старых, что происходит со значительной интенсивностью [10]. В период выращивания молодые животные обладают высокой способностью к наращиванию массы мышц, хорошо используют протеин корма для формирования мышечной ткани, дают высокие приросты при относительно эффективном использовании энергии и протеина кормов [11].

Широко известные методы оценки мясной продуктивности животных и определяющие эффективность использования корма недостаточно характеризуют их способности к максимальному производству пищевого белка. Наиболее объективную оценку животного в этом случае дают показатели конверсии и трансформации питательных веществ корма в продукцию [12, 13].

Основной путь улучшения рентабельности производства говядины состоит в повышении эффективности биоконверсии питательных веществ корма в продукцию, прежде всего за счет совершенствования генетического потенциала мясного скота [14]. Дальнейшее развитие мясного скотоводства и интенсификация сельскохозяйственного производства предъявляют новые требования к породе. Фундаментальные знания о молекулярно-генетических механизмах, определяющих особенности использования корма для производства

говядины, создадут основу для направленной селекции мясного скота с заданными параметрами продуктивности [15].

Высокая корреляция между живой массой, массой мякоти и затратами кормов свидетельствует о том, что на эти признаки влияет схожий комплекс генов. Ряд исследований отмечают влияние полиморфизмов генов гормона роста и тиреоглобулина на эффективность использования корма, весового роста, убойных показателей и химический состав говядины, что свидетельствует о том, что генетические вариации этих генов могут влиять на эффективность преобразования корма в массу тела у крупного рогатого скота [16, 17].

Поэтому исследование генетических аспектов превращения энергии и протеина корма в энергию и протеин мясной продукции имеет высокую теоретическую и практическую значимость для сельскохозяйственной науки. Развитие новых направлений в селекции с учетом генетических маркеров создаст предпосылки для раннего прогнозирования продуктивных качеств, определит возможности отбора и сокращения интервала между поколениями для ускоренного совершенствования мясного скота [18, 19].

Цель данной работы — оценка влияния полиморфизмов генов гормона роста и тиреоглобулина на анатомо-морфологическую характеристику и эффективность трансформации энергии и протеина кормов в продукцию у герефордских бычков.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В работе приведены данные по контрольному выращиванию бычков ($n = 9$) герефордской породы с мая 2023 г. по февраль 2025 г. в условиях племязавода ООО «Агрофирма Калининская» Челябинской области Российской Федерации.

Молодняк для откорма отбирали после отъема от матерей в возрасте 205 дней. На этом этапе их генотипировали по генам гормона роста (GH) и тиреоглобулина (TG5). По результатам генотипирования комплектовали группы для откорма по 3 гол. носителей каждого генотипа изучаемых полиморфизмов. Общее поголовье составило 9 гол.

Бычков разных генотипов выращивали при одинаковых условиях кормления и содержания до 21-месячного возраста¹, после чего провели контрольный убой согласно ГОСТ 34120-2017².

Выращивание молодняка в подсосный период проводили по системе «корова — теленок». Зимой животные содержались вместе с коровами в помещениях легкого типа на соломенной подстилке. В летний период до отъема телята вместе с коровами выпасались на пастбищах. В этот период основными кормами для телят являлись молоко

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

² ГОСТ 34120-2017 Крупный рогатый скот для убоя. Говядина и телятина в тушах, полутушах и четвертинах. Технические условия.

и трава. Отъем молодняка проводили по достижении ими живой массы не менее 200 кг и возраста 6–8 месяцев. После отъема бычков перевели на откормочную площадку при беспривязном содержании. Кормление и поение осуществлялись на выгульном дворе из групповых кормушек и поилок.

Контроль за весовым ростом бычков проводили ежемесячно от рождения до 21 месяца в одну и ту же дату с использованием электронных весов. Кормление проводили 3 раза в день, рационы кормления составляли в соответствии с детализированными нормами с поправкой на возраст, живую массу и среднесуточный прирост животных. Контроль потребления кормов проводили индивидуально ежедневно по разнице между заданным количеством и остатками.

В структуре потребленных кормов по питательности за весь период выращивания молоко составляло 11,3%, сено — 17,7%, сенаж — 7,1%, зерносенаж — 13,6%, трава — 8,2%, концентраты — 42,1% (табл. 1).

По окончании откорма (возраст 21 месяц) провели контрольный убой животных. После охлаждения в течение 24–48 ч. тушу раздвигали на естественно-анатомические отруба и проводили обвалку. Среднюю пробу мяса-фарша в количестве 400 г отбирали из левой полутуши. Из этой же полутуши перед обвалкой взяли путем поперечного среза мышцы пробу (200 г) длиннейшей мышцы спины на уровне 9–11-го ребра. Определение содержания сухого вещества проводили путем высушивания образцов в сушильном шкафу при 100 °С. Органическое вещество определяли озолением высушенного образца при 550 °С. Анализ химического состава мяса выполняли в соответствии с ГОСТ 9793-2016³, ГОСТ 25011-2017⁴, ГОСТ 23042-2015⁵.

Исследования выполнены в Центре коллективного пользования биологических систем и агротехнологий РАН (<http://цкп-бст.рф>). Оценку животных по эффективности конверсии питательных веществ и энергии корма в основные питательные вещества мясной продукции проводили по методике ВАСХНИЛ⁶.

Для генотипирования по полиморфизмам генов GH L127V гормона роста и TG5 (с. -422C>T) тиреоглобулина у подопытных бычков проводили забор крови из яремной вены. Выделение ДНК проводили из цельной крови с использованием набора реагентов для выделения геномной ДНК «М-сорб кровь» («Синтол», Россия).

ПЦР-амплификацию проводили на термоциклере Biorad T100 (BioRad, Сингапур) в смеси объемом 15 мкл, содержащей по 1,5 мкл смеси динитрофосфатов и 10х-буфера, по 0,03 мкл каждого

Таблица 1. Потребление кормов бычками разных генотипов за 21-месячный период выращивания (в среднем на одну голову)

Table 1. Feed intake by bulls of different genotypes over a 21-month rearing period (on average per head)

Показатель	GH			TG5		
	LL	LV	VV	CC	CT	TT
Молоко, кг	1041	1062	1048	1056	1051	1044
Сено разнотравное, кг	1748	1862	1869	1815	1828	1835
Сенаж из ячменя, кг	1455	1686	1666	1593	1604	1610
Сенаж из суданки, кг	2642	2821	2870	2761	2780	2792
Зерносесь, кг	2622	2622	2622	2622	2622	2622
Зеленая масса, кг	1848	1832	1822	1843	1836	1823
Трава пастбищная, кг	656	626	638	636	641	643
Премикс, кг	130	130	130	130	130	130
В кормах содержатся:						
Сухое вещество, кг	4539,0	4608,0	4607,0	4557,2	4589,3	4607,6
Обменная энергия, МДж	47 205,6	47 656,0	46 584,6	46 860,9	47 186,5	47 398,7
Сырой протеин, кг	584,1	621,0	621,6	618,5	604,3	603,9
Переваримый протеин, кг	446,3	451,2	452,0	449,6	439,3	439,0

праймера концентрацией 100 мМ и 1 е. а. Taq-полимеразы. Дизайн праймеров проводили с помощью онлайн-инструмента BLAST NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>).

Подбор эндонуклеаз рестрикции осуществляли в программе NEBcutter v2.0. (<https://nc2.neb.com/NEBcutter2/>). Использовались ферменты *AluI* и *BstX2I* (ООО «СибЭнзайм», Россия). Расщепление продуктов проводили при 37 °С, генотипы идентифицировали методом гель-электрофорез с визуализацией под УФ-светом. Идентификация продуктов для гена гормона роста: GH^{VV} — 223 п. н.; GH^{LV} — 223, 171, 52 п. н.; GH^{LL} — 171, 52 п. н. Для гена тиреоглобулина: TG5^{TT} — 473, 75 п. н.; TG5^{CT} — 473, 295, 178, 75 п. н.; TG5^{CC} — 295, 178, 75 п. н.

Результаты опыта были обработаны биометрически с использованием программ Excel (Microsoft, США) и Statistica 10 (Stat Soft Inc., США) по алгоритмам описательной статистики.

Определение значимости различий между групповыми средними проводили дисперсионным анализом по Критерию Фишера (критерий наименьшей значимости, F-критерий), при этом критический уровень значимости принимался $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты обвалки и жиловки полутуш герфордских бычков показали значительные различия по содержанию отдельных тканей тела в зависимости от генотипа по гену GH (табл. 2).

³ ГОСТ 9793-2016 Мясо и мясные продукты. Методы определения влаги.

⁴ ГОСТ 25011-2017 Мясо и мясные продукты. Методы определения белка.

⁵ ГОСТ 23042-2015 Мясо и мясные продукты. Методы определения жира.

⁶ Методические рекомендации оценки животных по эффективности конверсии корма в основные питательные вещества мясной продукции. М.: ВАСХНИЛ. 1983; 19.

Таблица 2. Морфологический состав полутуши герефордских бычков разных генотипов по генам GH и TG5 ($X \pm Sx$)
 Table 2. Effects of GH and TG5 gene polymorphisms on morphological composition of half carcasses in Hereford bulls ($X \pm Sx$)

Показатель	GH			TG5		
	LL (n = 3)	LV (n = 3)	VV (n = 3)	CC (n = 3)	CT (n = 3)	TT (n = 3)
Масса полутуши, кг	161,7 ± 6,69	178,0 ± 7,77	184,3 ± 3,18	179,0 ± 8,19	171,2 ± 8,88	173,3 ± 9,56
Масса мякоти, кг	114,2 ± 5,94 ^a	134,0 ± 5,18	139,8 ± 3,70 ^a	137,0 ± 6,44	126,1 ± 8,21	124,9 ± 10,09
Выход мякоти, %	70,61 ± 1,06 ^{a, b}	75,32 ± 0,45 ^a	75,80 ± 0,95 ^b	76,53 ± 0,38 ^a	73,35 ± 1,04	71,85 ± 1,88 ^a
Масса жира, кг	22,7 ± 1,04 ^{ab}	15,6 ± 2,00 ^a	16,3 ± 1,23 ^b	14,3 ± 1,72 ^a	18,5 ± 1,21	21,8 ± 1,95 ^a
Выход жира, %	14,06 ± 0,30 ^{a, b}	8,68 ± 0,78 ^b	8,83 ± 0,68 ^a	7,94 ± 0,64 ^a	10,91 ± 1,33	12,71 ± 1,60 ^a
Масса костей	22,4 ± 0,80 ^{ab}	25,5 ± 0,52 ^a	25,5 ± 0,30 ^b	25,0 ± 0,26	24,4 ± 1,75	24,1 ± 0,93
Выход костей, %	13,91 ± 0,63	14,38 ± 0,38	13,87 ± 0,40	14,02 ± 0,54	14,18 ± 0,31	13,95 ± 0,62
Масса сухожилий, кг	2,3 ± 0,30	2,9 ± 0,20	2,8 ± 0,09	2,7 ± 0,06	2,7 ± 0,15	2,6 ± 0,47
Выход сухожилий, %	1,42 ± 0,23	1,63 ± 0,08	1,50 ± 0,06	1,51 ± 0,07	1,55 ± 0,04	1,48 ± 0,23

Примечание: ^{a, b} — значения с одинаковыми индексами в строке различаются при $p < 0,05$.

LL-генотип отличался минимальной массой мякоти, костей и максимальной массой жировой ткани. Различия между группами носителей V-аллеля и LL-генотипом по массе мышечной ткани составляли 19,8–25,6 кг (17,3–22,4%; $p < 0,05$). Более интенсивное жиросотложение у бычков с LL-генотипом выражалось в превосходстве по накоплению жира в полутуше на 6,4–7,1 кг (39,3–45,5%; $p < 0,05$) относительно сверстников с V-аллелем. Ранг распределения генотипов по гену GH по содержанию костной ткани соответствовал развитию мякотной части туши при разнице между группами 3,1 кг (13,8%; $p < 0,05$).

Генетические особенности бычков по гену GH не оказали значительного влияния на вариабельность массы охлажденной полутуши, тем не менее установлены различия на уровне тенденции ($p = 0,09$) между носителями альтернативных гомозиготных генотипов, достигающих 22,6 кг (14,0%). V-аллель у герефордских бычков ассоциировалась с повышенной массой мякоти и развитием скелета, а у гетерозиготных животных наблюдалось промежуточное развитие тканей тела. Это согласуется с результатами убоя казахских белоголовых бычков, проведенных М.И. Selionova [20].

Кроме того, по данным М. Zalewska *et al.* [21] и J.V. Romero *et al.* [22], генетические варианты гена GH обуславливают различия в показателях мясной продуктивности, такие как масса туши, площадь мышечного глазка, толщина подкожного жира, содержание жира в туше.

Особенности развития тканей тела в большей мере характеризует анализ относительного содержания отдельных частей полутуши у герефордских бычков. Формирование мышечной ткани значительно детерминировано генотипом по гену GH. У носителей LL-генотипа она составляла 70,6% массы туши, что на 4,7–5,2% ($p < 0,05$) меньше гетерозиготных и гомозиготных сверстников с V-аллелем. Обратный ранг распределения генотипов наблюдался по содержанию жировой ткани. V-аллель ассоциирована с меньшей интенсивностью

жиросотложения и способствовала снижению доли жира в туше на 5,3–5,4% ($p < 0,05$) относительно LL-генотипа.

Влияние генотипа по гену TG5 на массу отдельных тканей тела было менее выражено. Значительные различия между гомозиготными группами установлены по количеству жира, которые составляли 7,5 кг (52,4%; $p < 0,05$) в пользу TT-генотипа. По остальным показателям морфологического состава полутуши носители CC-генотипа имели тенденцию к превосходству относительно сверстников. Полиморфизм гена TG5 оказывал влияние на изменчивость морфологического состава полутуши бычков герефордской породы. Между альтернативными гомозиготными генотипами была зафиксирована разница на уровне тенденции по содержанию мышечной ткани на 4,6% ($p < 0,05$) и жировой ткани на 4,8% ($p < 0,05$). Причем T-аллель ассоциировалась с интенсивным жиросотложением, а C-аллель — с развитием мускулатуры. Сочетание аллелей способствовало промежуточной выраженности развития тканей в теле у гетерозиготного генотипа.

Настоящие результаты согласуются с L.P. Zhang *et al.* [23], которые отмечали значительное ($p < 0,05$) влияние полиморфизмов гена тиреоглобулина (TG) на выход мякоти и площадь мышечного глазка. По данным I. Dolmatova *et al.* [24] (2020) и I. Sycheva *et al.* [25], более интенсивным жиросотложением отличались животные с TT-генотипом, а T-аллель ассоциировалась с повышенным содержанием жира в туше и мясе.

В зависимости от генотипа по гену GH бычки по-разному использовали сырой протеин корма на единицу прироста живой массы (табл. 3).

По данным К. Heine *et al.* [26], выявлена положительная корреляция содержания сырого протеина в рационе с развитием тканей тела у крупного рогатого скота.

В настоящих исследованиях носители V-аллели за период выращивания потребили на 6,4%

Таблица 3. Биоконверсия протеина и энергии корма в съедобные части тела герефордских бычков разных генотипов по генам GH и TG5 ($n = 9$, $\bar{X} \pm Sx$)

Table 3. Bioconversion of feed protein and energy into the edible body parts of Hereford bulls of different genotypes by GH and TG5 genes ($n = 9$, $\bar{X} \pm Sx$)

Показатель	GH			TG5		
	LL	LV	VV	CC	CT	TT
Потреблено на 1 кг прироста живой массы:						
сырой протеин, г	1092 ± 29,5	1085 ± 32,6	1048 ± 11,4	1083 ± 34,2	1074 ± 21,6	1067 ± 30,5
обменная энергия, МДж	88,39 ± 3,62	83,30 ± 3,34	78,57 ± 0,54	82,22 ± 3,80	84,06 ± 3,94	83,98 ± 4,21
Содержание протеина в теле, кг	56,0 ± 4,67	64,8 ± 3,36	66,0 ± 1,77	64,3 ± 3,27	61,7 ± 4,05	60,8 ± 5,94
Содержание жира в теле, кг	45,5 ± 4,19	45,5 ± 5,49	47,1 ± 3,93	44,6 ± 5,25	46,1 ± 5,26	47,3 ± 2,61
Выход на 1 кг живой массы:						
протеин, г	98,7 ± 4,30	106,3 ± 1,90	104,9 ± 2,29	105,7 ± 1,54	103,2 ± 3,21	101,0 ± 5,06
жир, г	80,6 ± 8,26	74,5 ± 7,81	74,7 ± 5,58	73,0 ± 6,35	76,9 ± 6,61	79,9 ± 8,75
энергия, МДж	5,51 ± 0,250	5,45 ± 0,348	5,42 ± 0,257	5,37 ± 0,282	5,47 ± 0,336	5,53 ± 0,229
Коэффициент конверсии протеина, %	9,1 ± 0,63	9,8 ± 0,43	10,0 ± 0,18	9,8 ± 0,40	9,6 ± 0,39	9,5 ± 0,72
Коэффициент конверсии обменной энергии, %	6,2 ± 0,36	6,6 ± 0,55	6,9 ± 0,38	6,6 ± 0,59	6,5 ± 0,57	6,6 ± 0,08

($p = 0,09$) больше сырого протеина корма, что сопровождалось лучшим развитием мышечной ткани и скелета. Однако расход сырого протеина и энергии в расчете на 1 кг прироста живой массы имел обратный ранг распределения генотипов по гену GH, а между гомозиготными бычками была установлена значительная разница — 9,82 МДж (11,1%; $p = 0,05$) — по потреблению обменной энергии рациона. Минимальное количество сырого протеина потребляли носители VV-генотипа, уступая сверстникам на 37–44 г (3,4–4,0%). Полиморфизм гена TG5 не оказывал влияния на изменчивость потребности в сыром протеине и обменной энергии корма в расчете на прирост живой массы.

В теле бычков с LL-генотипом содержалось наименьшее количество протеина, различия на уровне тенденции относительно гетерозиготных животных составляли 8,8 кг (15,7%; $p = 0,12$), гомозиготных носителей V-аллели — 10,0 кг (17,9%; $p = 0,08$). Меньшая доля протеина в составе прироста живой массы зафиксирована у молодняка с LL-генотипом, они уступали VV-особям на 6,2 г (5,9%; $p = 0,20$) и гетерозиготным сверстникам на 7,6 г (7,1%; $p = 0,12$). Разница между генотипами по гену GH по количеству накопленного жира в теле, а также его выходу на 1 кг прироста живой массы была незначительной.

При анализе содержания питательных веществ в теле на 1 кг живой массы бычков, генотипированных по гену TG5, не выявлено значительных межгрупповых различий. Лидерами по выходу пищевого протеина на единицу прироста являлись носители CC-генотипа с преимуществом 2,5–4,7 г (2,4–4,7%) относительно сверстников носителей T-аллели. По количеству синтезированного в теле жира в расчете на 1 кг живой массы превосходство

было на стороне TT-группы — на 3,0–6,9 г (3,9–9,6%). P. Kostusiak *et al.* [27] также не выявили значительного влияния полиморфизма гена TG на прирост живой массы в сухом веществе и обменной энергии.

Ключевым показателем эффективности мясного скотоводства является способность животных преобразовывать кормовой протеин и энергию в питательные вещества съедобной части туши [12, 28, 29]. В.Н. Приступа и др. [13] отмечали, что при одинаковых условиях кормления и содержания эффективность преобразования корма в массу тела у бычков определяется генетическими особенностями.

В настоящих исследованиях особенности синтеза питательных веществ в съедобных частях тела у бычков разных генотипов по гену GH определяли различия по коэффициентам конверсии протеина и энергии корма в пищевую белок и энергию мясной продукции. Различия между гомозиготными генотипами по биоконверсии протеина составляли 0,9% ($p = 0,19$), а по обменной энергии — 0,7%. Наибольшей эффективностью использования питательных веществ корма отличались бычки с VV-генотипом. Гетерозиготные животные имели промежуточные показатели конверсии.

При группировке бычков в соответствии с генотипом по гену TG5 варибельность трансформации питательных веществ корма в продукцию находилась в узких пределах. В разрезе генотипов 9,5–9,8% сырого протеина и 6,5–6,6% обменной энергии корма расходовались на образование тканей тела, при этом крайние варианты коэффициента конверсии протеина в выборке герефордских бычков достигали 8,05–10,29%, обменной энергии — 5,55–7,65%.

Выводы/Conclusions

Настоящее исследование выявило значительные ассоциации между полиморфизмами генов GH и TG5 и анатомо-морфологической оценкой туш способностью преобразовывать кормовой протеин и энергию в питательные вещества съедобной части тела крупного рогатого скота. В частности, наблюдались различные эффекты генетических вариантов на состав туши, развитие мышечной и жировой тканей, содержание питательных веществ и энергии в теле, особенности конверсии сырого протеина и обменной энергии для синтеза съедобных тканей туши у герефордских бычков. Аллель V гена GH продемонстрировал значительное влияние на параметры, связанные с высоким выходом мякоти, низкой

интенсивностью жирового обмена, невысокой потребностью обменной энергии корма на 1 кг прироста по сравнению с гомозиготными носителями LL-генотипа.

Аналогичным образом генотип TT гена TG5 показал корреляцию с вариациями в отложении жира в туше. Таким образом, внедрение наиболее точных методов прогнозирования и прижизненной оценки мясной продуктивности позволит комплектовать стада наиболее ценными животными без проведения убоя. Генетические вариации по генам GH и TG5 могут быть использованы для улучшения как количественных, так и качественных показателей мясной продуктивности герефордского скота при маркер-зависимой селекции.

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 соответствии с планом НИР на 2023–2025 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (FNWZ-2021-0001).

FUNDING

The research was carried out in accordance with the research plan for 2023–2025 of the Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (FNWZ-2021-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоус А.А., Сермягин А.А., Зиновьева Н.А. Система оценки мясного скота по показателям эффективности использования корма и энергии роста на основе применения цифровых и геномных технологий (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2022; 57(6): 1055–1070. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1055rus>
2. Косилов В.И. и др. Эффективность выращивания молодняка черно-пестрой породы и ее помесей с голштинами. *Мичуринский агрономический вестник*. 2023; (3): 36–40. <https://www.elibrary.ru/aobenb>
3. Старцева Н.В., Седых Т.А., Ребезов М.Б., Ермолова Е.М. Влияние генотипа бычков на интенсивность роста. *Мичуринский агрономический вестник*. 2022; (1): 17–22. <https://www.elibrary.ru/gbvjyi>
4. Жаймышева С.С., Нуржанов Б.С., Толочка В.В., Ребезов М.Б., Салихов А.А., Кубатбеков Т.С. Влияние генотипа бычков на возрастную динамику живой массы и интенсивность роста. *Мичуринский агрономический вестник*. 2020; (3): 20–26. <https://www.elibrary.ru/ejjafn>
5. Baber J.R., Sawyer J.E., Wickersham T.A. Evaluation of net protein contribution, methane production, and net returns from beef production as duration of confinement increases in the cow-calf sector. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(7): 2675–2686. <https://doi.org/10.1093/jas/skz145>
6. 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; (8): 39–44. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-39-44>
7. Шейда Е.В., Дускаев Г.К., Кван О.В., Букарева Е.А., Сечнев Ю.А. Особенности усвоения питательных веществ и химических элементов бычками при включении в рацион протеазы. *Аграрная наука*. 2025; (5): 63–68. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-63-68>
8. Ryazanov V., Duskaev G., Sheida E., Nurzhanov B., Kurilkina M. Rumen fermentation, methane concentration, and blood metabolites of cattle receiving dietetical phytobiotic and cobalt (II) chloride. *Veterinary World*. 2022; 15(11): 2551–2557. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2551-2557>
9. Гречкина В.В., Шейда Е.В., Кван О.В. Механизм взаимодействия организма животного с микробиотой желудочно-кишечного тракта (обзор). *Аграрная наука*. 2024; (4): 54–58. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-381-4-54-58>
10. Lebedev S. et al. Use of chromium nanoparticles as a protector of digestive enzymes and biochemical parameters for various sources of fat in the diet of calves. *AIMS Agriculture and Food*. 2021; 6(1): 14–31. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021002>

REFERENCES

1. Belous A.A., Sermiyagin A.A., Zinovieva N.A. Beef cattle evaluation by feeding efficiency and growth energy indicators based on bioinformatic and genomic technologies (review). *Agricultural Biology*. 2022; 57(6): 1055–1070 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1055eng>
2. Kosilov V.I. et al. Efficiency of growing young Black-and-White cattle and their crosses with Holsteins. *Michurinsky Agronomic Bulletin*. 2023; (3): 36–40 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/aobenb>
3. Startseva N.V., Sedykh T.A., Rebezov M.B., Ermolova E.M. Influence of bull genotype on growth intensity. *Michurinsky Agronomic Bulletin*. 2022; (1): 17–22 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/gbvjyi>
4. Zhaimysheva S.S., Nurzhanov B.S., Tolochka V.V., Rebezov M.B., Salikhov A.A., Kubatbekov T.S. The influence of bull genotype on age-related live weight dynamics and growth rate. *Michurinsky Agronomic Bulletin*. 2020; (3): 20–26 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ejjafn>
5. Baber J.R., Sawyer J.E., Wickersham T.A. Evaluation of net protein contribution, methane production, and net returns from beef production as duration of confinement increases in the cow-calf sector. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(7): 2675–2686. <https://doi.org/10.1093/jas/skz145>
6. 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; (8): 39–44 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-39-44>
7. Sheida E.V., Duskaev G.K., Kvan O.V., Bukareva E.A., Sechnev Yu.A. Features of the absorption of nutrients and chemical elements by gobies when the protease enzyme is included in the diet. *Agrarian science*. 2025; (5): 63–68 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-63-68>
8. Ryazanov V., Duskaev G., Sheida E., Nurzhanov B., Kurilkina M. Rumen fermentation, methane concentration, and blood metabolites of cattle receiving dietetical phytobiotic and cobalt (II) chloride. *Veterinary World*. 2022; 15(11): 2551–2557. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2022.2551-2557>
9. Grechkina V.V., Sheida E.V., Kvan O.V. The mechanism of interaction of the animal's body with the microbiota of the gastrointestinal tract (review). *Agrarian science*. 2024; (4): 54–58 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-381-4-54-58>
10. Lebedev S. et al. Use of chromium nanoparticles as a protector of digestive enzymes and biochemical parameters for various sources of fat in the diet of calves. *AIMS Agriculture and Food*. 2021; 6(1): 14–31. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021002>

11. Бесараб Г.В. и др. Повышение продуктивного действия кормов путем балансирования рационов молодняка крупного рогатого скота по протеину. *Актуальные проблемы репродуктивного здоровья животных. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Вятского государственного агротехнологического университета и 95-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки Российской Федерации д-ра ветеринар. наук, профессора А.И. Варганова*. Сыктывкар: ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. 2025; 64–68. <https://www.elibrary.ru/vircbm>
12. Valoshin A.V., Glazkov A.V. The use of Microvit A in the Form of a Synthetic supplement for Metabolic Processes and Localization of Protein Substances. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 2022; 15(7): 3101–3108. <https://doi.org/10.52711/0974-360X.2022.00519>
13. Приступа В.Н., Торосян Д.С., Савенков К.С. Формирование мясной продуктивности и трансформация питательных веществ и энергии корма в мякоть туши бычков различных пород. *Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии*. 2025; (1): 95–101. <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2025.1.95>
14. Ghavi Hossein-Zadeh N. An overview of recent technological developments in bovine genomics. *Veterinary and Animal Science*. 2024; 25: 100382. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100382>
15. Abo-Ismael M.K. et al. Development and validation of a small SNP panel for feed efficiency in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 2018; 96(2): 375–397. <https://doi.org/10.1093/jas/sky020>
16. Bila L., Malatji D.P., Tyasi T.L. Single nucleotide polymorphisms of growth hormone gene in cattle and their association with growth traits: a systematic review. *Tropical Animal Health and Production*. 2024; 56(4): 141. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03985-1>
17. Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Анисимова Е.Ю., Карпенко Е.В., Бадмаева К.Е., Убушиева В.С. Полиморфизм генов *GH*, *MC4R* и *CAPN1* у южных популяций крупного рогатого скота мясных пород и влияние на живую массу. *Животноводство и кормопроизводство*. 2023; 106(3): 21–34. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-21>
18. McPhee M.J., Walmsley B.J., Dougherty H.C., McKiernan W.A., Oddy V.H. Live animal predictions of carcass components and marble score in beef cattle: model development and evaluation. *Animal*. 2020; 14(S2): s396–s405. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000324>
19. Kolpakov V., Bukareva E., Kosyan D., Ruchay A., Ryazanov V. Identification of Candidate Genes Associated with Meat Production of Aberdeen Angus Cattle. *Animals*. 2025; 15(2): 155. <https://doi.org/10.3390/ani15020155>
20. Selionova M.I., Plakhtyukova V.R. Biochemical and histological indicators of blood and m. longissimus dorsi of young bulls of Kazakh white-headed breed of different genotypes by the CAPN1 and GH genes. *Теория и практика переработки мяса*. 2020; 5(2): 20–25. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2020-5-2-20-25>
21. Zalewska M., Puppel K., Sakowski T. Associations between gene polymorphisms and selected meat traits in cattle — A review. *Animal Bioscience*. 2021; 34(9): 1425–1438. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0672>
22. Romero J.V., Olleta J.L., Resconi V.C., Santolaria P., del Mar Campo M. Genetic markers associated with beef quality: A review. *Livestock Science*. 2024; 289: 105583. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105583>
23. Zhang L.P., Gan Q.F., Hou G.Y., Gao H.J., Li J.Y., Xu S.Z. Investigation of TG gene variants and their effects on growth, carcass composition, and meat quality traits in Chinese steers. *Genetics and Molecular Research*. 2015; 14(2): 5320–5326.
24. Dolmatova I., Sedykh T., Valitov F., Gizatullin R., Khaziev D., Kharlamov A. Effect of the bovine TG5 gene polymorphism on milk- and meat-producing ability. *Veterinary World*. 2020; 13(10): 2046–2052. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2046-2052>
25. Sycheva I. et al. Effect of TG5 and LEP polymorphisms on the productivity, chemical composition, and fatty acid profile of meat from Simmental bulls. *Veterinary World*. 2023; 16(8): 1647–1654. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.1647-1654>
26. Heine K. et al. Investigation of Body Development in Growing Holstein Heifers With Special Emphasis on Body Fat Development Using Bioelectrical Impedance Analysis. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 724300. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.724300>
27. Kostusiak P. et al. Genetic Markers Related to Meat Quality Properties in Fattened HF and HF x Charolaise Steers. *Genes*. 2024; 15(7): 843. <https://doi.org/10.3390/genes15070843>
11. Besarab G.V. et al. Improving the productive action of feed by balancing the protein content of young cattle rations. *Current issues of animal reproductive health. Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of Vyatka State Agrotechnological University and the 95th anniversary of the birth of the Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Veterinary Sciences, Professor A.I. Varganov*. Syktvykar: Federal Research Center of Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2025; 64–68 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/vircbm>
12. Valoshin A.V., Glazkov A.V. The use of Microvit A in the Form of a Synthetic supplement for Metabolic Processes and Localization of Protein Substances. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 2022; 15(7): 3101–3108. <https://doi.org/10.52711/0974-360X.2022.00519>
13. Pristupa V.N., Torosyan D.S., Savenkov K.S. Formation of meat productivity and transformation of nutrients and feed energy into carcass pulp of bulls of various breeds. *Legal regulation in veterinary medicine*. 2025; (1): 95–101 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2025.1.95>
14. Ghavi Hossein-Zadeh N. An overview of recent technological developments in bovine genomics. *Veterinary and Animal Science*. 2024; 25: 100382. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100382>
15. Abo-Ismael M.K. et al. Development and validation of a small SNP panel for feed efficiency in beef cattle. *Journal of Animal Science*. 2018; 96(2): 375–397. <https://doi.org/10.1093/jas/sky020>
16. Bila L., Malatji D.P., Tyasi T.L. Single nucleotide polymorphisms of growth hormone gene in cattle and their association with growth traits: a systematic review. *Tropical Animal Health and Production*. 2024; 56(4): 141. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-03985-1>
17. Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Anisimova E.Yu., Karpenko E.V., Badmaeva K.E., Ubushieva V.S. Polymorphism of the *GH*, *MC4R* and *CAPN1* genes in southern beef cattle populations and their impact on live weight. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023; 106(3): 21–34 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-21>
18. McPhee M.J., Walmsley B.J., Dougherty H.C., McKiernan W.A., Oddy V.H. Live animal predictions of carcass components and marble score in beef cattle: model development and evaluation. *Animal*. 2020; 14(S2): s396–s405. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000324>
19. Kolpakov V., Bukareva E., Kosyan D., Ruchay A., Ryazanov V. Identification of Candidate Genes Associated with Meat Production of Aberdeen Angus Cattle. *Animals*. 2025; 15(2): 155. <https://doi.org/10.3390/ani15020155>
20. Selionova M.I., Plakhtyukova V.R. Biochemical and histological indicators of blood and m. longissimus dorsi of young bulls of Kazakh white-headed breed of different genotypes by the CAPN1 and GH genes. *Theory and practice of meat processing*. 2020; 5(2): 20–25. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2020-5-2-20-25>
21. Zalewska M., Puppel K., Sakowski T. Associations between gene polymorphisms and selected meat traits in cattle — A review. *Animal Bioscience*. 2021; 34(9): 1425–1438. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0672>
22. Romero J.V., Olleta J.L., Resconi V.C., Santolaria P., del Mar Campo M. Genetic markers associated with beef quality: A review. *Livestock Science*. 2024; 289: 105583. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105583>
23. Zhang L.P., Gan Q.F., Hou G.Y., Gao H.J., Li J.Y., Xu S.Z. Investigation of TG gene variants and their effects on growth, carcass composition, and meat quality traits in Chinese steers. *Genetics and Molecular Research*. 2015; 14(2): 5320–5326.
24. Dolmatova I., Sedykh T., Valitov F., Gizatullin R., Khaziev D., Kharlamov A. Effect of the bovine TG5 gene polymorphism on milk- and meat-producing ability. *Veterinary World*. 2020; 13(10): 2046–2052. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2046-2052>
25. Sycheva I. et al. Effect of TG5 and LEP polymorphisms on the productivity, chemical composition, and fatty acid profile of meat from Simmental bulls. *Veterinary World*. 2023; 16(8): 1647–1654. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.1647-1654>
26. Heine K. et al. Investigation of Body Development in Growing Holstein Heifers With Special Emphasis on Body Fat Development Using Bioelectrical Impedance Analysis. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 724300. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.724300>
27. Kostusiak P. et al. Genetic Markers Related to Meat Quality Properties in Fattened HF and HF x Charolaise Steers. *Genes*. 2024; 15(7): 843. <https://doi.org/10.3390/genes15070843>

28. Гречкина В.В., Шейда Е.В., Кван О.В., Шевченко А.Д. Применение экзогенных кормовых ферментов в питании жвачных животных. *Аграрная наука*. 2025; (4): 69–74. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-69-74>

29. Василевский Н.В., Березин А.С., Лысова Е.А., Ушаков А.С., Сметанина И.Г., Демьянов А.В. Выращивание бычков на мясо при использовании в их рационах низкораспадаемых кормовых средств. *Аграрная наука*. 2023; (4): 80–86. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-369-4-80-86>

28. Grechkina V.V., Sheida E.V., Kvan O.V., Shevchenko A.D. The use of exogenous feed enzymes in the nutrition of ruminants. *Agrarian science*. 2025; (4): 69–74 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-69-74>

29. Vasilevsky N.V., Berezin A.S., Lysova E.A., Ushakov A.S., Smetanina I.G., Demyanov A.V. Cultivation of bulls for meat when using low-decaying feed products in their diets. *Agrarian science*. 2023; (4): 80–86 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-369-4-80-86>

ОБ АВТОРАХ

Киниспай Мурзагулович Джуламанов
доктор сельскохозяйственных наук, руководитель селекционно-генетического центра по мясным породам скота
kinispai.d@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8039-7471>

Николай Павлович Герасимов
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
nick.gerasimov@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2295-5150>

Александра Андреевна Сафронова
лаборант-исследователь
sovaalexandra@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8609-8640>

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Kinispay Murzagulovich Dzhulamanov
Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Breeding and Genetic Center for Beef Cattle Breeds
kinispai.d@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8039-7471>

Nikolay Pavlovich Gerasimov
Doctor of Biology Sciences, Leading Researcher
nick.gerasimov@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2295-5150>

Aleksandra Andreevna Safronova
Laboratory Researcher
sovaalexandra@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8609-8640>

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9th January Str., Orenburg, 460000, Russia



3–4 декабря 2025 г. в Москве
пройдет XVII Международная научно-практическая конференция
«Свиноводство-2025. Новый инвестиционный этап в 2026–2030 гг. — качественный импульс в развитии отрасли»



Организаторы конференции: Национальный союз свиноводов, Международная промышленная академия.

Конференция проводится при поддержке: Министерства сельского хозяйства РФ, Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору РФ.

Основные темы обсуждения:

- Свиноводство России: качественные изменения и ориентиры до 2030 года
- Новый инвестиционный этап как стимул дальнейшего развития и совершенствования отрасли
- Отечественная ветеринария на пути к импортозамещению
- Эффективные кормовые решения в свиноводстве
- Биобезопасность на свиноводческих предприятиях
- Генетическое совершенствование отечественного свиноводства
- Интеллектуальные системы управления свиноводческими предприятиями.

К участию в конференции приглашаются: руководители и специалисты агрохолдингов, свиноводческих, мясоперерабатывающих и комбикормовых предприятий; органов управления АПК субъектов Российской Федерации, отраслевых союзов и ассоциаций АПК; отечественных и зарубежных компаний, фирм и предприятий — производителей оборудования, ингредиентов, ветеринарных препаратов; ученые и преподаватели научно-исследовательских институтов, высших и средних профессиональных учебных заведений, а также редакторы отраслевых СМИ.

Конференция будет проходить в гибридном формате, который предусматривает офлайн- (личное) и онлайн-участие.

Справки

Реклама

МПА:

Кафедра отраслей животноводства и комбикормового производства

Завкафедрой профессор
Щербакова
Ольга Евгеньевна
тел/факс (495) 959-71-06
scherbakovae@grainfood.ru

Доцент
Агеева
Ксения Михайловна
тел/факс (499) 235-48-27
a89057777955@yandex.ru

Декан
Карцева
Ольга Павловна
тел/факс (499) 235-95-79
dekanat@grainfood.ru

НСС:

Главный эксперт по развитию отрасли

Аксаньян
Григорий Степанович
тел. (495) 690-53-17
next@nssrf.ru

УДК 632.938.1:633.52

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-91-97

Т.А. Рожмина ✉

А.В. Мясникова

Н.В. Пролётова

Федеральный научный центр
лубяных культур, Тверь, Россия

✉ len_rozhmina@mail.ru

Поступила в редакцию: 12.08.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Рожмина Т.А., Мясникова А.В.,
Пролётова Н.В.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-91-97

Tatyana A. Rozhmina ✉

Anastasia V. Myasnikova

Natalia V. Proletova

Federal Research Center for Bast Fiber
Crops Tver, Russia

✉ len_rozhmina@mail.ru

Received by the editorial office: 12.08.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Rozhmina T.A., Myasnikova A.V.,
Proletova N.V.

Источники вертикальной устойчивости льна масличного к фузариозному увяданию

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Фузариозное увядание — наиболее известное вредоносное заболевание льна. Изменение климата, стремительное расширение площадей под масличным льном в стране вызывают опасность эпифитотий данного заболевания. Выведение сортов с различными высокоэффективными генами устойчивости позволит обеспечить надежную защиту от патогена.

Методы. Фитопатологическая оценка устойчивости к фузариозному увяданию выполнялась в условиях вегетационного опыта и климатической камеры (температура воздуха 26 °C). Селективные фоны созданы с помощью чистой культуры возбудителя *Fusarium oxysporum f. lini* — изолята 39 и искусственной популяции патогена. Внесение инфекции в почву осуществляли из расчета 400 г на ящик размером 50 x 85 x 20 см.

Результаты. Проведен скрининг 60 коллекционных образцов льна масличного, выявлены 35 источников устойчивости к фузариозному увяданию, которые проявили высокий уровень резистентности (81,2–100%) на селективных фонах, что указывает на наличие у них высокоэффективных R-генов к данному заболеванию. Установлено усиление вирулентности изолята 39 при повышенной температуре воздуха (26 °C) в период «всходы — елочка», что привело к снижению экспрессии генов у 37,1% выделенных устойчивых образцов (пораженность 39,0–83,4%), высокий уровень устойчивости сохранили 22 генотипа: Уральский, Легур, Altess, Raciol, BS-12, Арну и др. С помощью фитопатологического тестирования образцов льна с измененным жирнокислотным составом AGT 422, AGT 987, Raciol (среднелиноленовые), AGT 427 и AGT 1538 (низколиноленовые) выявлены различия в реакции их на заражение 13 изолятами возбудителя, что позволяет сделать предположение о наличии у них неидентичных генов вертикальной устойчивости к патогену.

Ключевые слова: *Linum usitatissimum* L., *Fusarium oxysporum f. lini*, источники, фитопатологический тест, моноизолят, вертикальная устойчивость, возбудитель, коллекционный образец

Для цитирования: Рожмина Т.А., Мясникова А.В., Пролётова Н.В. Источники вертикальной устойчивости льна масличного к фузариозному увяданию. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 91–97.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-91-97>

Sources of vertical resistance of oilseed flax to fusarium wilt

ABSTRACT

Relevance. Fusarium wilt is the most harmful disease of flax. Climate change and rapid expansion of areas under oil flax in the country pose a risk of epiphytotic of this disease. Breeding varieties with various highly effective resistance genes will provide reliable protection against the pathogen.

Methods. Phytopathological assessment of resistance to fusarium wilt was performed under the conditions of a vegetation experiment and a climate chamber (air temperature 26 °C). Selective backgrounds were created using a pure culture of the causative agent *Fusarium oxysporum f. lini* — isolate 39 and an artificial population of the pathogen. The infection was introduced into the soil at the rate of 400 g per 50 x 85 x 20 cm box.

Results. Screening of 60 collection samples of flaxseed was carried out, 35 sources of resistance to fusarium wilt were identified, which showed a high level of resistance (81.2–100%) on selective backgrounds, which indicates the presence of highly effective R-genes for this disease. An increase in the virulence of isolate 39 was established at elevated air temperature (26 °C) during the germination-herringbone period, which led to a decrease in gene expression in 37.1% of the isolated resistant samples (damage 39.0–83.4%), a high level of resistance was retained by 22 genotypes: Uralsky, Legur, Altess, Raciol, BS-12, Arny, etc. Phytopathological testing of flax samples with modified fatty acid composition AGT 422, AGT 987, Raciol (medium-linolenic), AGT 427 and AGT 1538 (low-linolenic) revealed differences in their response to infection with 13 isolates of the pathogen, which suggests that they have non-identical vertical resistance genes to the pathogen.

Key words: *Linum usitatissimum* L., *Fusarium oxysporum f. lini*, genetic sources, phytopathological test, monoisolate, vertical resistance, pathogen, collection samples

For citation: Rozhmina T.A., Myasnikova A.V., Proletova N.V. Sources of vertical resistance of flaxseed to fusarium wilt *Agrarian science*. 2025; 400(11): 91–97 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-91-97>

Введение/Introduction

Лен масличный широко используется в различных отраслях: лакокрасочной, пищевой, фармацевтической, парфюмерной промышленности и др. [1, 2]. Ценность данной культуры обусловлена уникальным биохимическим составом льняного семени. В семенах современных сортов содержание жиров составляет свыше 45%. Высокий уровень содержания полиненасыщенных жирных кислот в масле (свыше 50%) делает его незаменимым сырьем при производстве красок и лаков, обеспечивая их надежность и долговечность [3].

Создание сортов с измененным жирнокислотным составом масла позволяет рассматривать семена льна как ценный продукт пищевого, лечебного и профилактического назначения [4]. Европейская платформа по биотопливным технологиям признала семена масличного льна как перспективное сырье для производства современного биотоплива [5].

Отходы маслобойного производства являются ценным высокобелковым кормом для животных [6]. Солома масличного льна может быть использована для производства различных нетканых материалов [7].

Выявление в составе льняного семени новых биологически активных компонентов, представляющих большую ценность для здоровья человека, технологичность и высокую доходность данной культуры, привело к всплеску спроса на данный продукт во всем мире и, как следствие, росту посевных площадей. Так, площадь посевов льна масличного в Российской Федерации составляет свыше 1,4 млн га, что более чем в 2 раза выше по сравнению с 2015 годом¹. Вместе с тем расширение посевных площадей, изменение климата и другие факторы ведут к усилению распространности различных патогенных микроорганизмов, появлению новых рас и их биотипов, что требует поиска новых подходов, обеспечивающих эффективную защиту культуры от биогенных угроз [8, 9].

Наиболее распространенным и вредоносным заболеванием льна во всем мире является фузариозное увядание, которое вызывает узкоспециализированный возбудитель *Fusarium oxysporum* f. sp. *lini*. Данное заболевание может приводить к 100%-ной гибели посевов, при этом патоген сохраняется в почве в виде хламидоспор в течение десятилетий. В условиях России идентифицированы 16 физиологических рас данного возбудителя [10].

Передача инфекции патогена осуществляется, как правило, через почву, что указывает на перспективность селекции льна на вертикальную устойчивость. В настоящее время у льна выявлены 12 R-генов устойчивости к фузариозному увяданию, из которых 9 генов идентифицированы с участием авторов. Создана линейка современных

сортов льна-долгунца, обладающих различными высокоэффективными генами устойчивости к *F. oxysporum* f. sp. *lini*, что позволяет за счет научно обоснованного их размещения предотвратить опасность эпифитотий заболевания на данной культуре [11].

На льне масличном такие исследования практически не проводили [12–14]. В современных условиях одним из важнейших направлений в селекции масличного льна является создание сортов с измененным жирнокислотным составом пищевого и медицинского назначения, в связи с чем вопрос устойчивости их к фузариозному увяданию приобретает еще большую значимость [15].

Цель исследований — выявить новые источники вертикальной устойчивости к фузариозному увяданию для селекции льна масличного.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (Тверская обл., Российская Федерация) в 2022–2024 гг.

Образцы для исследования были получены из коллекции льна ФНЦ лубяных культур.

Фитопатологическую оценку на устойчивость к фузариозному увяданию выполняли на инфекционных фонах в условиях вегетационного опыта и климатической камеры в соответствии с методическими указаниями по селекции и первичному семеноводству льна-долгунца².

Инфекционный фон в условиях вегетационного опыта был создан с помощью чистой культуры возбудителя *Fusarium oxysporum* f. *lini*, которая была внесена в почву из расчета 400 г инокулюма на ящик размером 50 x 85 x 20 см.

Почву для посева инфекционного питомника на устойчивость к фузариозному увяданию рано весной просеивали через грохот, в первых числах мая приступали к набивке (заполнению) ящиков. После набивки на 2/3 ящика в него вносили чистую культуру возбудителя, которую равномерно распределяли по всей поверхности, затем ее засыпали почвой до верха ящика. Наполненные таким образом ящики с почвой обильно поливали водой, затем покрывали полиэтиленовой пленкой и оставляли для развития инфекции фузариума в почве.

Перед посевом изучаемых генотипов льна, который осуществляли в III декаде мая, почву тщательно выравнивали, затем маркировали ящичным маркером. Посев осуществляли с площадью питания одного растения — 2,5 x 2,5 см, глубина заделки семян — 1 см. Размещали генотипы в ящике следующим образом: два ряда по периметру ящика являются защитными, которые засеивали восприимчивым сортом.

¹ Лен масличный (кудряш). Посевные площади, валовые сборы и урожайность в 2023 году [электронный ресурс].

Режим доступа: <https://ab-centre.ru/news/len-maslichnyy-kudryash-posevnye-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-v-2023-godu>

² Селекция и первичное семеноводство льна-долгунца: методические указания. Тверь: Тверской государственный университет. 2014; 140.

Исследуемые генотипы льна высевали по 16 семян в расположенную поперек ящика деланку (рядок), повторность — трехкратная. В каждый ящик высевали сорта-стандарты, в качестве стандартов использовали сорта масличного льна, различающиеся по устойчивости к данному заболеванию: Vitagold — сильновосприимчивый, Raciol — высокоустойчивый, обладающий высокоэффективным R-геном [14].

Для выявления источников вертикальной устойчивости к фузариозному увяданию на фонах с искусственно созданной популяцией и сильновирulentным моноизолятом 39 гриба *F. oxysporum f. lini* в условиях вегетационного опыта была проведена оценка 60 перспективных сортов, селекционных линий и ландрасов масличного льна, имеющих различное эколого-географическое происхождение (табл. 1).

С целью выявления влияния температурного фактора на вирулентность изолята 39 гриба *F. oxysporum f. lini* проведена оценка образцов льна масличного в условиях климатической камеры с использованием экспресс-метода³, предусматривающего тестирование на зараженность патообразцом 30-дневных растений, выращиваемых при оптимальном для возбудителя температурном режиме воздуха (26 °C), освещенность составляла 15 000 люкс, влажность почвы — свыше 60% от полной полевой влагоемкости, продолжительность светового периода — 16 ч. Лен высевали в ящики размером 20 x 45 x 10 см.

Чистую культуру изолята вносили из расчета 40 г на ящик. По каждому генотипу высевали 16 семян, повторность — трехкратная. Проведены 2 закладки опыта.

В качестве стандартов использовали сорта льна масличного, различающиеся по устойчивости к данному заболеванию: Vitagold — сильновосприимчивый, Raciol — высокоустойчивый.

На втором этапе для установления генетической близости между перспективными образцами масличного льна по признаку устойчивости к фузариозному увяданию была исследована реакция их на заражение 13 моноизолятами гриба *F. oxysporum f. lini* в условиях вегетационного опыта.

Моноизоляты выделены из штаммов «Коллекции микроорганизмов — возбудителей болезней льна» ФНЦ ЛК, различающихся по вирулентности: 504, 441, 464, 518, 501, 517, 403, 458, 502 — сильновирulentные; 345 средневирulentные, 115, 175 — слабовирulentные.

Большинство штаммов выделены из вегетирующих растений льна, собранных в условиях Тверской области. Исключение составила чистая культура биообразца 175, которая поступила в коллекцию из Бельгии, 458 — выделен из вегетирующих растений льна, собранных с посевов фирмы Terra de Lin (Франция).

Таблица 1. Эколого-географическое происхождение коллекционных образцов масличного льна, включенных в изучение

Table 1. Ecological and geographical origin of the collection samples of flaxseed included in the study

Происхождение	Название образца и номер каталога коллекции ФНЦ ЛК
Россия	Воронежский 1308/138, к-3052; № 3801, к-5591; № 3814, к-5600; № 3829, к-5608; № 3871, к-5627; № 3896, к-5635; Лерур, к-6341; ЛМ 98, к-7446; Уральский, к-7196; Кинельский 2000, к-7445
Республика Беларусь	Илим, к-7035
Франция	Symphonia, к-6654; Oleane, к-6896; Eolle, к-7034; Altess, к-7060; Dochess, к-7061; Baikal, к-7260
Нидерланды	Atalante, л. 2 к-5575; Bilton, к-7209
Германия	к-3123
Великобритания	Lola, к-7263
Северная Ирландия	Vitagold, к-7255
Чешская Республика	Raciol, к-7208; AGT 987, к-7225; AGT 427, к-7231; AGT 1535, к-7235; AGT 1538, к-7236; AGT 422/10, к-7246
Румыния	Roman Winter, к-1672
Венгрия	Lina Deta, к-6957
Италия	Сицилийский, к-407; Siciliana 285, к-4056
Турция	TR-42713, к-5094
Грузия	к-2784
Узбекистан	Бахмальский 1056, к-3447
Китай	v 45 № 8, к-7054; Selectiong 3, к-7148
Афганистан	Rnavial 6-2, к-4447
Индия	BS-12, к-5543
Австралия	Eyre, к-7446; Walaga, к-7447
США	Bison, к-1684; Redving Sel. к-1709; Arny, к-3908; Minnesota, к-5657
Канада	Dufferin, к-4822; Norlin, к-5553; Linda, к-5649; V-2965, к-6335; Fr-931, к-6338; Fr 681, к-6339; FP-704, к-6345; Prairie Blue, к-7210; McDuff, к-7212
Аргентина	к-550; Linota, к-1771; L. Florblanca, к-3316; Entre-Rios, к-7254
Эфиопия	к-1147
Египет	Gisa sel, к-1743

Из исследуемых образцов, представленных в таблице 1, в выборку для фитотестирования были включены генотипы льна масличного, представляющие интерес для создания специализированных сортов пищевого и медицинского назначения, из которых 8 сортов и селекционных линий характеризовались низким содержанием линоленовой кислоты в масле (менее 10%) — ЛМ 98, AGT 981, AGT 1538, AGT 1535, AGT 427, Lola, Eyre, Walaga, 3 — средним (18,5–35%) (AGT 987, AGT 422, Raciol).

Учет пораженности образцов льна масличного болезнью в вегетационном опыте проводили в период уборки — в фазу ранней желтой спелости.

При фитопатологическом анализе стеблей определяли количество пораженных растений и их степень по 4-балльной шкале, где, соответственно, 0 — здоровое растение (поражение отсутствует); 1 — растение частично побурело (одностороннее

³ Методические указания по фитопатологической оценке устойчивости льна к болезням. М.: Типография Россельхозакадемии. 2000; 52.

побурение стебля); 2 — побурело всё растение с коробочками; 3 — полностью пораженное растение, погибшее до образования коробочек.

Степень развития болезни подсчитывают по общепринятой в практике фитопатологии формуле:

$$P_6 = \frac{\Sigma(a \times b) \times 100}{A \times K}$$

где: P_6 — степень развития болезни (%); a — число растений с одинаковыми признаками поражения; b — соответствующий этому признаку балл поражения; Σ — сумма произведений числовых показателей; A — число растений в учете (здоровых и больных); K — высший балл учетной шкалы.

Ранжирование изучаемых образцов по уровню устойчивости к *F. oxysporum f. lini* было проведено на основании анализа растений по степени поражения: до 20% — устойчивые; 21–30% — относительно устойчивые; 31–50% — средневосприимчивые; свыше 50% — сильновосприимчивые (в соответствии с методическими указаниями по фитопатологической оценке устойчивости льна к болезням⁴ и международной классификацией⁵).

Статистическая обработка данных выполнена с использованием методики Б.А. Доспехова⁶.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Для выявления источников вертикальной устойчивости к фузариозному увяданию проведена оценка 60 перспективных линий, сортов и ландрасов льна масличного отечественной и зарубежной селекции на фонах с искусственно созданной популяцией и сильновирulentным моноизолятом 39 гриба *F. oxysporum f. lini*.

Стандартами служили сильновосприимчивый сорт льна масличного Vitagold, пораженность которого в том и другом случае составила 100%, и высокоустойчивый сорт Raciol, степень поражения — 7,2% и 0% соответственно (табл. 2).

Следует отметить, что у подавляющего большинства образцов значения показателей «степень поражения» и «процент пораженных растений» совпадали, что обусловлено гибелью растений на ранней стадии развития из-за жесткости инфекционного фона (балл поражения — 3).

Из 60 изучаемых образцов льна масличного высокий уровень устойчивости (81,2–100%) как к сильновирulentному моноизоляту № 39, так и популяции *F. oxysporum f. lini* в условиях вегетационного опыта проявили 35 генотипов. В их числе перспективные линии и сорта отечественной селекции — № 3801, № 3896, № 3871, Легур, Уральский, а также полученные из других стран: Франции — Eolle, Symphonia, Baikal, Oleane, Bilton;

Таблица 2. Поражение образцов льна масличного фузариозным увяданием на различных инфекционных фонах (среднее за 2022–2024 гг.)

Table 2. Infection of flaxseed samples with fusarium wilt on different selective backgrounds (average for 2022–2024)

№ п/п	Название и происхождение образца	Пораженность <i>F. oxysporum f. lini</i> , %		
		Вегетационный опыт		Климатическая камера
		искусственная популяция	моно-изолат 39	
1	№ 3801, Россия	0	6,3*/**	12,5*
2	№ 3871, Россия	18,8*/12,5**	0	0
3	№ 3896, Россия	0	0	6,3
4	Легур, Россия	12,5*/**	0	15
5	Уральский, Россия	0	16,7	20
6	Eolle, Франция	8,4	18,8	16,7
7	Altess, Франция	18,8	6,3	12,5
8	Symphonia, Франция	16,3	20/12,5	71,0
9	Baikal, Франция	0	0	39,8
10	Oleane, Франция	7,2	12,5	41,7
11	Atalante, Нидерланды	0	16,7	26,7
12	Bilton, Нидерланды	0	6,3	41,5
13	AGT 1538, Чешская Республика	0	7,15	25,0
14	AGT 422/10, Чешская Республика	18,8	16,7	16,7
15	AGT 987, Чешская Республика	0	0	52,0
16	AGT 427, Чешская Республика	16,7	0	60,0
17	Roman Winter, Румыния	0	0	8,9
18	к-2784, Грузия	0	0	64,0
19	Selectiong 3, Китай	0	0	5,6
20	Rnavial 6-2, Афганистан	0	0	10,0
21	BS 12, Индия	0	0	0
22	Minnisota, США	0	0	11,1
23	Army, США	0	14,3	16,7
24	Bison, США	18,3	0	4,6
25	Redving sel., США	7,2	0	35,6
26	Linda, Канада	6,3	16,7	0
27	McDuff, Канада	7,2	18,8	13,7
28	Fr 931, Канада	6,3/4,2	0	0
29	Fr 681, Канада	6,3	6,3	52,0
30	Dufferin, Канада	15,5	25/18,8	53,7
31	Norlin, Канада	0	0	75,0
32	FP 704, Канада	16,7	16,7/11,1	83,4
33	L. Florblanca, Аргентина	0	0	12,5
34	Entre-Rios, Аргентина	7,2	12,5	78,6
35	Gisasel, Египет	0	0	3,9
36	Vitagold, Северная Ирландия (стандарт)	100	100	100
37	Raciol, Чешская Республика (стандарт)	7,2	0	12,5
HCP _{0,05} ***		21,4	25,3	22,5

Примечание: * поражено растений, ** степень поражения; *** существенно на 0,05-процентном уровне значимости по показателю «поражено растений».

⁴ Методические указания по фитопатологической оценке устойчивости льна к болезням. М.: Типография Россельхозакадемии. 2000; 52.

⁵ Descriptor list for flax (*Linum usitatissimum* L.). 2011; 103.

⁶ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов [предисл. Д.В. Васильевой и др.]. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат. 1985; 351.

Нидерландов — Atalante, Bilton; Чешской Республики — AGT 422, AGT 427, AGT 1538, AGT 987; Румынии — к-1672 (Roman Winter); Грузии — к-2784; Китая — Selectiong 3; Индии — BS 12; Афганистана — Rnival 6-2; США — Bison, Minnesota, Arny, Redving sel; Канады — Fr 931, FP 704, Fr 681, Linda, McDuff, Dufferin, Norlin; Аргентины — L. Florblanca, Entre-Rios; Египта — Gisasel, к-1743.

Степень поражения фузариозным увяданием на обоих инфекционных фонах у данных образцов находилась в диапазоне от 0 до 18,8%, процент пораженных растений — от 0 до 25%, что указывает на наличие у них высокоэффективных генов вертикальной устойчивости к патогену.

У генотипов к-1147 (Эфиопия), к-4056 (Италия) и McBeth (к-7211, Канада), проявивших высокий уровень устойчивости в варианте с моноизолятом 39 (92,8–100 %), выявлено повышение степени поражения и процента пораженных растений на фоне с популяцией патогена. Величина признаков составила 28,6% и 42,8%, 37,5% и 39,6%, 40,0% и 46,7% соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о недостаточно высокой эффективности имеющихся у этих образцов генов вертикальной устойчивости к фузариозному увяданию.

Сорт Dochess, напротив, в сильной степени поражен моноизолятом 39 *F. oxysporum f. lini* (62,5%), при этом пораженность популяцией возбудителя оказалась слабой (10%). Данный факт можно объяснить взаимодействием включенных в состав популяции возбудителя изолятов, что привело к подавлению вирулентности, в частности моноизолята 39, который был включен в состав созданной искусственной популяции патогена. Все другие образцы льна масличного, включенные в изучение, в средней и сильной степени поразились на обоих селективных фонах.

Как известно, вирулентность расового состава возбудителей болезней сельскохозяйственных культур при изменении температурного фактора подвержена колебаниям.

Авторами был проведен скрининг выделенных устойчивых образцов льна масличного в условиях климатической камеры на фоне с сильновирulentным изолятом № 39 при оптимальном для возбудителя температурном режиме воздуха и достаточной влагообеспеченности. Как показал проведенный анализ, большая часть исследуемых генотипов льна масличного сохранила высокий и относительно высокий уровень устойчивости к заболеванию (свыше 70%), их доля составила 62,9% от общего количества тестируемых образцов. Вместе с тем у ряда образцов (Symphonia, Baikal, к-7260, Oleane — Франция; Bilton — Нидерланды; к-2784 — Грузия; Redving Sel. к-1709 — США; Fr 681, Dufferin, Norlin, FP 704 — Канада; Entre-Rios, к-7254 — Аргентина) было выявлено снижение уровня устойчивости. Так, количество пораженных растений составило от 39% (Baikal — Франция) до 83,4% (FP 704 — Канада).

Данный факт указывает на усиление вирулентности изолята 39 при повышенной температуре воздуха на ранних этапах развития растений, что и привело к снижению экспрессии генов устойчивости у этих образцов.

В силу приоритетности селекции, направленной на создание специализированных сортов льна масличного для пищевой и медицинской промышленности, что имеет особую значимость для решения проблемы продовольственной безопасности страны, был проведен анализ генетических особенностей устойчивости к фузариозному увяданию у образцов с низким и средним содержанием линоленовой кислоты в льняном масле с использованием фитопатологического теста.

Из анализируемой выборки образцов, обладающих измененным жирнокислотным составом масла, высокоэффективными генами устойчивости к фузариозному увяданию, как следует из представленных результатов исследований, обладают линии и сорта чешской селекции — Raciol, AGT 1538, AGT 422, AGT 427 и AGT 987. При этом отмечали снижение экспрессии генов устойчивости селекционных линий AGT 987 и AGT 427 на фоне с изолятом 39 под действием температурного фактора. Сорта ЛМ 98 (Россия), Lola (Великобритания), Eyre, Walaga (Австралия) и линия AGT 1535 (Чехия) оказались сильновосприимчивыми (степень поражения 55,6–100%) как при заражении популяцией патогена, так и сильновирulentным изолятом 39.

На основании теории Х. Флора генотип растения-хозяина можно предположительно определить без гибридологического анализа, пользуясь изолятами возбудителя болезни, различающихся по вирулентности [16]. Реакция исследуемых образцов льна масличного на заражение различными моноизолятами возбудителя позволила дифференцировать их по степени агрессивности. Так, изоляты 39, 502 и 175 поразили в средней (SR) и сильной (S) степени (35,9–100%) большую часть исследуемых образцов льна масличного, что указывает на высокий уровень их агрессивности.

При этом на фонах с изолятами 39 и 502 поражение проявилось в начале вегетации растений, в результате чего степень поражения и процент пораженных растений оказались практически одинаковыми. Изоляты 441, 464, 115, 518, 458 и 346 поразили в средней (SR) и сильной (S) степени — от 41,7 до 50% генотипов. Изолят 501 оказался практически авирулентным, поразив в средней степени (SR) только один сорт льна масличного Lola (табл. 3).

На основании реакции исследуемых образцов на заражение возможно сделать предположение, что все используемые изоляты генетически различаются между собой и, следовательно, обладают дифференцирующей способностью.

По результатам фитотестирования линия AGT 427 проявила высокий уровень устойчивости (R) практически ко всем изолятам возбудителя (степень поражения 19%), за исключением изолята 518 (RS = 28,6%). Сорт Raciol оказался относительно

Таблица 3. Реакция образцов льна масличного с измененным жирнокислотным составом на заражение различными моноизолатами *Fusarium oxysporum f. lini*

Table 3. Response of flaxseed samples with altered fatty acid composition to infection with various monoisolates of *Fusarium oxysporum f. lini*

Название образца	Название моноизолята гриба <i>F. oxysporum f. lini</i>												
	403	441	501	517	502	464	504	175	115	518	458	345	39
AGT 427*	R	R	R	R	R	R	R	R	R	RS	R	R	R
Raciol**	RS	R	R	R	R	R	R	R	RS	R	R	R	R
AGT 1538*	S	R	R	R	R	R	R	R	R	R	RS	R	RS
AGT 987**	R	RS	R	R	S	R	S	RS	R	R	R	R	R
AGT 422**	RS	R	R	R	SR	RS	R	SR	R	R	R	R	R
ЛМ 98*	RS	SR	R	R	S	S	R	SR	R	R	SR	R	S
AGT1535*	R	SR	R	SR	S	R	R	SR	S	S	R	SR	S
AGT 981*	RS	R	R	SR	S	R	R	SR	RS	S	SR	RS	S
Eyre*	R	RS	R	R	S	SR	R	R	SR	S	SR	SR	S
Walaga*	R	R	R	R	S	RS	R	SR	SR	SR	R	SR	S
Lola*	S	S	SR	SR	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Vitagold (стандарт)	S	S	RS	SR	S	SR	SR	S	S	S	S	S	S

Примечание: * низколиноленовые и ** высоколиноленовые; R — устойчивые (степень поражения до 20%), RS — относительно устойчивые (21–30%), SR — средневосприимчивые (31–50%), S — сильновосприимчивые (свыше 50%).

устойчивым к изолятам 403, 464 и 115 (RS = 25,0–27,8%), а ко всем другим изолятам — высокоустойчив (R = 0–16,7%). Линия AGT 1538 в средней степени поразила изолятом 403 (SR = 41,7%), а линия AGT 422 — изолятами 502 и 175 (SR = 41,7% и 50% соответственно). Линия AGT 987 в сильной степени поразила изолятами 502, 504 (S = 75% и 62,5% соответственно), в средней — изолятом 441 (SR = 33,3%).

Представленные данные указывают на генетические различия по устойчивости к фузариозному увяданию между всеми тестируемыми генотипами, что согласуется с данными гибридологического анализа, позволившими идентифицировать различные гены резистентности (R) к патогену у сорта Raciol (Fu 9) и линий AGT 987 (Fu 11), AGT 1538 (Fu 12) [15].

Выводы/Conclusions

В результате фитопатологического тестирования 60 коллекционных образцов льна масличного выявлены 35 образцов, проявивших высокий уровень устойчивости (81,2–100%). Установлено

усиление патогенности моноизолята 39 при повышенной температуре воздуха (+26 °C) в начале вегетации растений, что привело к снижению экспрессии генов устойчивости у ряда выделившихся образцов (пораженность 39,0–83,4%). При этом 22 генотипа сохранили высокий уровень устойчивости — 80–100% (Уральский, Легур, Altess, AGT 1538, AGT 422/10, Raciol, BS 12, Arny, Bison и др.), что указывает на высокую эффективность их генов резистентности, которая не зависела от температурного фактора.

На основе фитопатологического теста, включающего 13 моноизолятов с различной вирулентностью, выявлена различная реакция на заражение у образцов льна масличного с измененным жирнокислотным составом масла — Raciol, AGT 987, AGT 422 (среднелиноленовые), AGT 427 и AGT 1538 (низколиноленовые), что позволяет сделать предположение о неидентичности их R-генов резистентности. Данные генотипы являются ценным исходным материалом для создания устойчивых к фузариозному увяданию сортов льна масличного пищевого и фармацевтического назначения.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках ФНТП масличных культур ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», тема № FGSS-2025-0002.

FUNDING

The research was carried out within the framework of the FNTPT of oilseeds Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center of Bast Crops", topic No. FGSS-2025-0002.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косых Л.А. Лен масличный — культура пищевого использования (обзор). *Аграрная наука*. 2021; (10): 56–59. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-353-10-56-59>
2. Mueed A., Shibli S., Jahangir M., Jabbar S., Deng Z. A comprehensive review of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.): health-affecting compounds, mechanism of toxicity, detoxification, anticancer and potential risk. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022; 63(32): 11081–11104. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2092718>

REFERENCES

1. Kosykh L.A. Oil flax — food culture (review). *Agrarian science*. 2021; (10): 56–59 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-353-10-56-59>
2. Mueed A., Shibli S., Jahangir M., Jabbar S., Deng Z. A comprehensive review of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.): health-affecting compounds, mechanism of toxicity, detoxification, anticancer and potential risk. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022; 63(32): 11081–11104. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2092718>

3. Hussin M.H. *et al.* Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 21: 3909–3946. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156>
4. Farag M.A., Elimam D.M., Afifi S.M. Outgoing and potential trends of the omega-3 rich linseed oil quality characteristics and rancidity management: A comprehensive review for maximizing its food and nutraceutical applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2021; 114: 292–309. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.041>
5. Batog J. *et al.* Effective Use of Flax Biomass in Biorefining Processes. *Applied Sciences*. 2023; 13(13): 7359. <https://doi.org/10.3390/app13137359>
6. Xu L. *et al.* Flaxseed Meal and Its Application in Animal Husbandry: A Review. *Agriculture*. 2022; 12(12): 2027. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122027>
7. Fombuena V., Petrucci R., Dominici F., Jordá-Vilaplana A., Montanes N., Torre L. Maleinized Linseed Oil as Epoxy Resin Hardener for Composites with High Bio Content Obtained from Linen Byproducts. *Polymers*. 2019; 11(2): 301. <https://doi.org/10.3390/polym11020301>
8. Sánchez-Martín J., Keller B. Contribution of recent technological advances to future resistance breeding. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019; 132(3): 713–732. <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03297-1>
9. Зеленцов С.В., Рябенко Л.Г., Мошненко Е.В., Зеленцов В.С. Селекция льна масличного на устойчивость к льноутомлению для короткороотационных севооборотов засушливых регионов юга России. *Достижения науки и техники АПК*. 2016; 30(6): 9–11. <https://www.elibrary.ru/wjxnit>
10. Samsonova A. *et al.* A Genomic Blueprint of Flax Fungal Parasite *Fusarium oxysporum* f. sp. *lini*. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(5): 2665. <https://doi.org/10.3390/ijms22052665>
11. Рожмина Т.А., Голубева Л.М. Эффективные гены устойчивости к фузариозному увяданию у современных сортов льна-долгунца. *Масличные культуры*. 2018; (4): 37–41. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-37-41>
12. Ригин Б.В., Гаевская Е.И. (ред.). Идентифицированный генофонд растений и селекция. СПб.: ВИР. 2005; 895. <https://www.elibrary.ru/qizykv>
13. Зеленцов В.С., Рябенко Л.Г., Зеленцов С.В., Мошненко Е.В., Овчарова Л.Р., Сляров С.В. Сорт масличного льна Ы 117. *Масличные культуры*. 2018; (4): 181–184. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-181-184>
14. Рожмина Т.А., Мясникова А.В. Идентификация генов устойчивости к фузариозному увяданию у образцов льна масличного с различным жирнокислотным составом. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023; 24(6): 980–988. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.980-988>
15. Голуб И.А., Андроник Е.Л., Иванова Е.В. Лен масличный: тенденции производства и использования. *Земледелие и защита растений*. 2017; (S4): 32–35. <https://www.elibrary.ru/chautg>
16. Flor H.H. The Complementary Genic Systems in Flax and Flax Rust. *Advances in Genetics*. 1956; 8: 29–54. [https://doi.org/10.1016/S0065-2660\(08\)60498-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2660(08)60498-8)
3. Hussin M.H. *et al.* Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 21: 3909–3946. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156>
4. Farag M.A., Elimam D.M., Afifi S.M. Outgoing and potential trends of the omega-3 rich linseed oil quality characteristics and rancidity management: A comprehensive review for maximizing its food and nutraceutical applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2021; 114: 292–309. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.041>
5. Batog J. *et al.* Effective Use of Flax Biomass in Biorefining Processes. *Applied Sciences*. 2023; 13(13): 7359. <https://doi.org/10.3390/app13137359>
6. Xu L. *et al.* Flaxseed Meal and Its Application in Animal Husbandry: A Review. *Agriculture*. 2022; 12(12): 2027. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122027>
7. Fombuena V., Petrucci R., Dominici F., Jordá-Vilaplana A., Montanes N., Torre L. Maleinized Linseed Oil as Epoxy Resin Hardener for Composites with High Bio Content Obtained from Linen Byproducts. *Polymers*. 2019; 11(2): 301. <https://doi.org/10.3390/polym11020301>
8. Sánchez-Martín J., Keller B. Contribution of recent technological advances to future resistance breeding. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019; 132(3): 713–732. <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03297-1>
9. Zelentsov V.S., Ryabenko L.G., Moshnenko E.V., Zelentsov V.S. Breeding of Oil Flax for Resistance to Flax sickness of Soil for BriefCrop Rotation of the Arid Regions of the Southern Russia Areas. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2016; 30(6): 9–11 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wjxnit>
10. Samsonova A. *et al.* A Genomic Blueprint of Flax Fungal Parasite *Fusarium oxysporum* f. sp. *lini*. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(5): 2665. <https://doi.org/10.3390/ijms22052665>
11. Rozhmina T.A., Golubeva L.M. Effective genes of resistance to fusarium wilt in modern flax varieties. *Oil Crops*. 2018; (4): 37–41 (in Russian). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-37-41>
12. Rigin B.V., Gaevskaya E.I. (eds.). Identified plant genepool and breeding. St. Petersburg: N.I. Vavilov All-Russian Scientific Research Institute of Plant Industry. 2005; 895 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/qizykv>
13. Zelentsov V.S., Ryabenko L.G., Zelentsov S.V., Moshnenko E.V., Ovcharova L.R., Slyarov S.V. The oil flax variety Y 117. *Oil Crops*. 2018; (4): 181–184 (in Russian). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-181-184>
14. Rozhmina T.A., Myasnikova A.V. Identification of resistance genes to Fusarium wilt in oil flax samples with different fatty acid composition. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023; 24(6): 980–988 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.980-988>
15. Golub I.A., Andronik E.L., Ivanova E.V. Oil flax: production and use trends. *Agriculture and Plant Protection*. 2017; (S4): 32–35 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/chautg>
16. Flor H.H. The Complementary Genic Systems in Flax and Flax Rust. *Advances in Genetics*. 1956; 8: 29–54. [https://doi.org/10.1016/S0065-2660\(08\)60498-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2660(08)60498-8)

ОБ АВТОРАХ

Татьяна Александровна Рожмина

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией селекционных технологий
len_rozhmina@mail.ru

Анастасия Владимировна Мясникова

аспирант, инженер-исследователь
a.myasnikova.trk@fncl.ru

Наталья Викторовна Пролётова

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, заведующая отделом селекционных и биотехнологий
science.trk@fncl.ru

Федеральный научный центр лубяных культур,
Комсомольский пр-т, 17/56, Тверь, 172002, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Tatyana Aleksandrovna Rozhmina

Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Selection Technologies
len_rozhmina@mail.ru

Anastasia Vladimirovna Myasnikova

Postgraduate Student, Research Engineer
a.myasnikova.trk@fncl.ru

Natalia Viktorovna Proletova

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Head Department of Breeding and Biotechnology
science.trk@fncl.ru

Federal Research Center for Bast Fiber Crops,
17/56 Komsomolsky Prospect, Tver, 172002, Russia

Эффективность методов отбора исходного материала по качеству семян льна-долгунца в первичном семеноводстве

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Применяемые методы отбора в первичном семеноводстве ориентированы на тестирование прежде всего растений по отдельным признакам или комплексу признаков. В связи с этим обоснование необходимости и изучение эффективности методов отбора по качественным признакам семян является актуальным и имеет практическое значение.

Методы. Исследования проводили согласно методикам закладки и проведения полевых экспериментов с льном-долгунцом, методическим указаниям по первичному семеноводству льна-долгунца. Оценку показателей посевного качества и морфобиологических свойств семян культуры осуществляли в соответствии с действующим ГОСТом.

Результаты. Установлено, что растения льна-долгунца в питомнике отбора различались между собой по величине массы семени на соцветии, которая изменялась от 4,4 до 5,2 мг. Выявлена неоднородность коробочек (плодов) по величине массы семени в пределах соцветия растений. С учетом особенностей формирования массы семени на растении и в коробочке (плоде) обоснована возможность проведения отбора по качеству семян. Методы отбора по массе семени, размерным показателям и массе семени, а также по качеству семян в сочетании с предварительным тестированием растений по морфобиологическим признакам позволили увеличить выход обновленных семян льна-долгунца по сравнению с контролем в 2,9–5,3 раза, обеспечить необходимый уровень посевного качества (всхожесть 93–97%) и морфобиологических свойств, а также снижение затрат труда на 22–51%.

Ключевые слова: лен-долгунец (*Linum usitatissimum*), растения, семена, метод, отбор, признак, масса

Для цитирования: Козьякова Н.Н. Эффективность методов отбора исходного материала по качеству семян льна-долгунца в первичном семеноводстве. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 98–104.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-98-104>

The effectiveness of the methods of selecting the source material for the quality of flax seeds in primary seed production

ABSTRACT

Relevance. The applied selection methods in primary seed production are focused primarily on testing plants for individual or complex traits. In this regard, the justification of the need and the study of the effectiveness of seed selection methods based on qualitative characteristics is relevant and has practical significance.

Methods. The research was carried out according to the methods of laying and conducting field experiments with flax, the methodological guidelines for the primary seed production of flax. The assessment of seed quality and morphophysiological properties of crop seeds was carried out in accordance with the current GOST.

Results. It was found that the flax plants in the selection nursery differed from each other in the amount of seed mass on the inflorescence, which varied from 4.4 to 5.2 mg. The heterogeneity of the pods (fruits) in terms of seed mass within the inflorescence of plants was revealed. Taking into account the peculiarities of the formation of seed mass on the plant and in the box (fruit), the possibility of seed quality selection is justified. Selection methods based on seed weight, size and seed weight, as well as seed quality, combined with preliminary testing of plants for morphological characteristics, made it possible to increase the yield of updated flax seeds by 2.9–5.3 times compared with the control, to ensure the necessary level of seed quality (germination 93–97%) and morphophysiological properties, and There is also a 22–51% reduction in labor costs.

Key words: fiber flax (*Linum usitatissimum*), plants, seeds, method, selection, trait, mass

For citation: Kozyakova N.N. The effectiveness of the methods of selecting the source material for the quality of flax seeds in primary seed production. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 98–104 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-98-104>

Введение/Introduction

Производство необходимого объема семян льна-долгунца высокого качества для гарантированного обеспечения посевным материалом льносеющих хозяйств в значительной степени определяется состоянием первичного семеноводства. Важнейшей задачей при этом является получение требуемого количества оригинальных семян культуры с высокими посевными, сортовыми и урожайными качествами. Методы отбора исходного материала и создания оригинальных семян льна-долгунца являются основными элементами системы первичного семеноводства, которые оказывают влияние на эффективность последующего производства семенного материала.

Используемые в настоящее время методы отбора и создания семян в первичных звеньях семеноводства вследствие высокой трудоемкости и затратности не всегда позволяют обеспечить необходимый выход оригинального материала, характеризующегося не только высокими посевными и сортовыми качествами, но и комплексом морфологических и физико-механических свойств. Эти свойства оказывают влияние на дружность прорастания семян и появления всходов, энергичность роста и развития растений на начальных этапах вегетации. Однако при проведении отбора исходного материала льна-долгунца по-прежнему недостаточно учитываются качественные показатели семян, в том числе масса семени, однородность по массе семени и другие индикаторы качества [1, 2].

В созданных партиях обновленных семян льна-долгунца, полученных при отборе типичных растений, присутствуют фракции с пониженной массой, плотностью, выраженной неоднородностью по размерным показателям (длине, ширине и толщине семени), сформировавшиеся по причине негативного влияния в течение вегетации прежде всего абиотических факторов. После тестирования растений такие семена остаются в посевном материале [2–5].

Под влиянием абиотических факторов (повышенной влажности, высокой температуры воздуха) семена с пониженной массой приобретают темную окраску, что вызывает формирование неоднородного по цвету урожая семенного материала. Эти семена, формируясь преимущественно в центральной части соцветия растения, имеют пониженную всхожесть, высокий уровень зараженности болезнями, а также измененный элементный состав [6–9].

Масса семени является одним из важнейших качественных показателей, который учитывается при проведении отборов в первичном семеноводстве многих сельскохозяйственных культур [10, 11]. Выполненные крупные семена имеют большой запас органических веществ и высокое содержание минеральных элементов. Это создает благоприятные условия для обеспечения энергичных процессов роста на начальных и последующих этапах развития растений, формирования высокой их

продуктивности. От биологической полноценности семян зависят характер, направленность биохимических процессов в растениях на протяжении всей вегетации [12].

Не меньшее значение имеют размерные показатели семени (длина, ширина и толщина), которые находятся в тесной взаимосвязи с его массой [12]. Эти и другие качественные показатели семян в немалой степени связаны с морфологическими признаками растений, в том числе с количеством на них коробочек, что является важным для уточнения параметров семени и их последующего использования при создании высокооднородного оригинального материала, прежде всего новых сортов льна-долгунца. Новые сорта культуры, выведенные с использованием высокоэффективных селекционно-генетических методов, характеризуются высокой продуктивностью, высоким содержанием и качеством волокна, а также комплексной устойчивостью к болезням, полеганию и стрессовым факторам среды [13, 14]. Однако из-за нерешенности некоторых проблем в первичном семеноводстве, в том числе проблем, связанных с созданием высококачественного оригинального материала, они медленно внедряются в производство.

Совершенствование методов отбора исходного материала и создания обновленных семян предусматривает необходимость оценки их сортового качества [15, 16]. Результаты грунтового контроля показывают, что некоторые партии семян, созданных в процессе отбора, содержат нетипичный материал и в соответствии с существующими требованиями подлежат переводу в более низкие категории.

Из этого следует, что при совершенствовании методов отбора и создания обновленных семян льна-долгунца представляется важным учитывать необходимость получения оригинального материала, обладающего одновременно высоким уровнем сортового и посевного качества, а также комплексом морфологических показателей и физических свойств. При этом представляется важным методическое обоснование целесообразности проведения отбора исходного материала по комплексу качественных признаков семян и использования полученных результатов для изучения эффективности методов отбора в условиях полевого эксперимента.

Для тестирования по качеству семян необходимым является предварительный отбор исходных растений льна-долгунца по определенным признакам с последующим получением из них семян. Прежние методы предусматривали отбор и оценку только самих растений, которые после отнесения их к типичным имели определенное количество семян с пониженной массой. Это позволяет создавать высокооднородный обновленный семенной материал, обладающий высокими сортовыми качествами и морфофизиологическими свойствами, повысить эффективность первичного семеноводства, а вместе с этим обеспечить

ускоренное продвижение новых сортов льна-долгунца в производство.

Цель исследований — изучить эффективность проведения отбора исходного материала льна-долгунца по качественным признакам семян в первичном семеноводстве.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования выполняли на опытном поле и в лаборатории селекционных и биотехнологий ФГБНУ ФНЦ «Федеральный научный центр лубяных культур» в 2022–2024 годах (Тверская обл., Россия).

Предмет изучения — полученные в процессе отбора растения льна-долгунца и выделенные из них семена среднеспелого сорта Визит, созданного в ФГБНУ ФНЦ ЛК и включенного в Госреестр селекционных достижений РФ¹.

Объекты исследований — процесс, критерии отбора и тестирования исходного материала по соответствующим признакам, в том числе по массе семян.

Исследования выполняли согласно методическим указаниям по первичному семеноводству льна-долгунца², грунтовому контролю³, проведению полевых опытов со льном-долгунцом⁴. Закладку питомников отбора проводили в четырехкратной повторности. Учетная площадь делянки — 7 м².

Посев семян льна осуществляли ленточным двухстрочным способом (7,5 × 45 см).

Для обоснования необходимости проведения отбора исходного материала по качественным признакам осуществляли тестирование растений по числу коробочек, количеству и качеству содержащихся в коробочках семян, массе семени в пределах соцветий растений и непосредственно в коробочках. Осуществляли оценку морфологических показателей и физико-механических свойств.

Контрольным вариантам в эксперименте являлся отбор растений, предусматривающий оценку морфологических признаков и содержания волокна в стебле. Критерий оценки по содержанию волокна в стебле — коэффициент вариации по этому признаку со значением, не превышающим 5%.

Отбор по массе семени предусматривал выделение из отобранных 3–12 коробочных растений семян, обладающих наибольшей массой семени (4,9–5,2 мг). Проведение отбора по размерным показателям и массе семени предусматривало удаление путем сортирования (калибрования) из полученного урожая нестандартных фракций

по длине (менее 4,0 мм), ширине (менее 2,2 мм) и толщине (менее 0,9 мм) семени и формирование тем самым партии, обладающей наибольшей массой семени. Метод отбора по морфологическим признакам растений с последующим проведением тестирования по размерным показателям и массе семени, включая удаление (браковку) высокостебельных и низкорослых одно-двухкоробочных растений и последующее выделение из полученного урожая обозначенных выше нестандартных по размерным показателям фракций семенного материала и формирование партии с наибольшей массой семени. Критерием оценки наибольшей массы семени являлся усредненный ее показатель по варианту. При осуществлении отбора из питомника удаляли высокостебельные и низкорослые, а также 1–2-коробочные растения.

Норма высева всхожих семян льна-долгунца в питомниках отбора составляла 6 млн/га. Оценка сортового качества семян проводили с использованием метода грунтового контроля. Посевные качества семян культуры определяли в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52325–2005⁵. Всхожесть посевных семян соответствовала категории оригинальных семян и составила 94–95%. Почва в местах закладки полевых экспериментов дерново-подзолистая среднесуглинистая, хорошо окультуренная и характеризовалась следующими показателями: РН kcl — 4,9–5,1; P₂O₅ — 201–272 мг/кг; K₂O — 118–185 мг/кг.

Посев семян, уход за посевами в течение вегетации и уборку льна-долгунца в полевых экспериментах проводили в оптимальные агротехнические сроки.

Агротехника при проведении полевых опытов общепринятая. Термины и определения использовали согласно ГОСТ Р 52784–2007⁶.

Массу семени определяли методом высокоточного взвешивания с использованием аналитических весов ВЛ-224В-С 2022 года изготовления («Госметр», Россия, поверен). Размерные показатели семени (длина, ширина, толщина) оценивали инструментальным методом с использованием электронного цифрового микрометра МКЦ-250.001 (Etalon, Китай). Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли согласно методике полевого опыта с использованием дисперсионного анализа⁷.

Метеорологические условия во время проведения исследований были следующими: в 2022 году гидротермический коэффициент, характеризующий отношением количества выпавших осадков

¹ Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. М.: Росинформагротех. 2023; 408.

² Понажев В.П., Павлова Л.Н., Рожмина Т.А. Селекция и первичное семеноводство льна-долгунца: методические указания. Тверь: Издательство Тверского государственного университета. 2014; 92–94.

³ Янышина А.А. Грунтовой контроль льна-долгунца: методические указания. М.: Типография Россельхозакадемии. 1999; 21.

⁴ Корпунин Ф.М., Петрова Л.М., Комаров А.М. Методические указания по проведению полевых опытов со льном-долгунцом. Торжок. Торжокская типография. 1978; 8–72.

⁵ ГОСТ Р 52325–2005 Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия. М.: Стандартинформ. 2005; 20.

⁶ ГОСТ Р 52784–2007 Лен-долгунец. Термины и определения. 2008; 7.

⁷ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): Монография. М.: Альянс. 2011; 295.

за вегетацию к сумме температур воздуха выше 10 °С, уменьшенного в 10 раз, составил 1,6 ед., в 2023 г. и 2024 г. — 1,9 ед. и 1,4 ед. соответственно.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Развитие роста растений на начальных этапах вегетации во многом зависит от величины массы семени, однородности семян по этому показателю.

Проведенные исследования, направленные на обоснование отбора исходного материала по качественным признакам, выявили значительную вариабельность массы семян у растений льна в питомнике.

Наблюдаемая гетерогенность свидетельствует о высокой фенотипической изменчивости в изучаемой популяции, что привело к формированию широкого диапазона значений данного признака. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего анализа и селекции для выделения перспективных генотипов с целевыми характеристиками.

Проведенный анализ выявил, что в посевном массиве питомника отбора 41,8% растений с одно- и двухкоробочной структурой характеризовались сниженной массой семян ($\leq 4,0$ мг). В то же время лишь 9,4% растений, имеющих от трех до девяти коробочек, демонстрировали аналогичные показатели. При этом 13,1% растений отличались повышенной массой семян ($\geq 5,6$ мг). Максимальные значения массы семян на соцветии (4,9–5,2 мг) были зарегистрированы у растений с 3–12 коробочками, тогда как минимальные показатели (4,4–4,5 мг) наблюдали у растений, формирующих от 13 до 16 коробочек (табл. 1).

Наибольшая изменчивость массы семени между растениями (1,6 мг) и, соответственно, наименьший уровень ее стабильности (отношение величины изменения массы семени к среднему значению массы), характеризуемый значением 0,63 единицы (1,0 ед. — максимальный), отмечены у 1–2-коробочных растений. Из полученных данных следует, что масса семян в соцветиях растений характеризуется значительной изменчивостью как на уровне отдельных растений, так и на уровне коробочек в пределах одного соцветия. Индекс стабильности массы семени на уровне соцветия составляет 0,81 ед., что указывает на относительно высокую стабильность массы семени в пределах одного соцветия. Однако при сравнении коробочек между собой в пределах соцветия наблюдается изменчивость массы семени в диапазоне 0,6–1,3 мг, что подчеркивает неоднородность даже внутри одного соцветия.

Наибольшая однородность массы семени наблюдается у растений с 3–9 коробочками, где средняя масса семени варьируется в пределах 4,8–5,2 мг. Это свидетельствует о том, что такие растения демонстрируют более стабильные

Таблица 1. Масса семени на соцветии растений льна-долгунца и уровень ее изменчивости

Table 1. The mass of the seed on the inflorescence of flax plants and the level of its variability

Количество коробочек на растении, шт.	Средняя масса семени на соцветии растения, мг	Интервал изменения массы семени между соцветиями растений, мг	Величина изменения массы семени между соцветиями растений, имеющих минимальное значение массы семени и максимальное ее значение в пределах группы растений, мг
1–2	4,6	3,8–5,4	1,6
3–4	5,0	4,2–5,7	1,5
5–6	5,2	4,8–5,7	0,9
7–8	4,9	4,6–5,2	0,6
9–10	4,9	4,4–5,2	0,8
11–12	4,9	4,6–5,2	0,6
13–14	4,5	4,5–5,0	0,5
15–16	4,4	4,0–4,6	0,6
HCP _{0,5}	0,3	0,2–0,1	0,4

характеристики массы семени по сравнению с растениями, имеющими большее или меньшее количество коробочек.

Общий индекс стабильности массы семени между коробочками в пределах соцветия для всех растений составил 0,79 ед., что немного ниже, чем индекс для отдельных соцветий. Это указывает на наличие дополнительной изменчивости между растениями.

Выявленные закономерности подчеркивают важность учета матрикальной изменчивости (изменчивости между соцветиями и коробочками) при проведении отбора растений по массе семени. Для повышения однородности и стабильности массы семени в селекционных программах рекомендуется учитывать не только средние значения массы семени, но и степень их изменчивости как на уровне отдельных растений, так и на уровне коробочек в пределах соцветия. Это позволит более эффективно проводить отбор и улучшать качество семенного материала.

Установленные различия по массе семени, изменчивость этого показателя между соцветиями растений и коробочками в пределах соцветия оказали влияние на формирование размерных показателей семян льна-долгунца. Исследования показали, что по мере увеличения массы семени возрастали его размерные показатели, причем наиболее значительно при увеличении массы семени от 3,8 до 4,2 мг (табл. 2).

Это обстоятельство в сочетании с выявленной более выраженной корреляционной зависимостью между размерными показателями семян, особенно между длиной и шириной (0,48–0,61 ед.) и наименьшей массой (3,8 мг) семени, было использовано для обоснования необходимости удаления нестандартной (мелкой) фракции путем сортирования (калибрования). При сортировании по размерным показателям семени доля удаленных нестандартных фракций составила, соответственно,

Таблица 2. Особенности формирования размерных показателей семян льна-долгунца

Table 2. Features of the formation of dimensional parameters of flax seeds

Показатели семени	Интервал изменения массы семени, выявленный в процессе исследований				
	3,5–4,0	4,1–4,3	4,4–4,8	4,9–5,1	5,2–5,6
	Средняя масса семени, выявленная в процессе исследований, мг				
	3,8	4,2	4,6	5,0	5,4
Размерные показатели семян, мм:					
длина	3,3	3,8	4,0	4,1	4,1
ширина	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4
толщина	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
Величина корреляционной зависимости (связи) размерных показателей от массы семени, мм:					
длина	0,61	0,52	0,40	0,39	0,42
ширина	0,48	0,44	0,41	0,37	0,39
толщина	0,31	0,33	0,31	0,33	0,34
В среднем по различным показателям	0,47	0,43	0,37	0,36	0,38
Выравненность семян (%) по размерным показателям:					
длина	36	49	58	65	76
ширина	59	67	90	92	84
толщина	46	49	65	66	69

Примечание: расчет проведен в единицах (1,0 ед. — максимально положительная корреляционная зависимость).

85,0%, 82,6% и 82,5%. Выявленные закономерности послужили основанием для изучения эффективности метода отбора по массе и размерным показателям семян льна-долгунца в полевом эксперименте.

Экспериментальные данные, характеризующие эффективность методов отбора, представлены в таблице 3.

Отбор исходного материала по сложной многоступенчатой методике, предложенной для старых сортов более 60 лет назад, позволил отобрать с варианта 291 типичное растение и, соответственно, только 68,3 г семян. Количество отобранных с варианта для обмолота растений и сортирования семян составило 1560 шт. После удаления из семенного материала нестандартной (мелкой) фракции были получены 365 г типичных семян.

Выявлено, что методы отбора исходного материала по качественным признакам семян льна-долгунца по сравнению с контрольным вариантом позволили увеличить выходной объем обновленного семенного материала в 2,9–5,3 раза.

Таблица 3. Влияние методов отбора исходного материала льна-долгунца на выходные количественные и качественные показатели обновленных семян

Table 3. The influence of the methods of selection of the source material of flax on the output quantitative and qualitative indicators of the updated seeds

Методы отбора исходного материала	Выход (масса) семян с 7 м ² , г	Всхожесть семян в полученном урожае, %	Масса 1000 шт. семян в полученном урожае, г	Длина проростка семени, см	Масса 100 сырых проростков — сила роста семян, г
Индивидуальный отбор растений по действующей методике (контроль)	68,3	96	4,43	5,0	2,0
Отбор по массе семени (семена получены из 3–12-коробочных растений)	202,4	97	4,63	4,1	1,8
Отбор по размерным показателям и массе семени (семена получены после калибрования)	365,0	93	4,44	4,2	1,8
Отбор по морфологическим признакам растений с последующим отбором по размерным показателям к массе семени	306,7	94	4,44	4,8	2,0
НСР ₀₅	53,1	3,0	0,01	0,2	0,1

В то же время показатели посевного качества семян — всхожесть и масса 1000 семян — незначительно зависели от методов отбора. Вместе с тем масса 1000 семян, удаленных в процессе сортирования (калибрования), оказалась на 19,4–21,4% меньше, чем полноценных.

Сила роста семян, определяемая массой 100 сырых проростков, изменялась в зависимости от методов отбора в пределах 1,8–2,0 г.

Результаты оценки однородности растений, выращенных из полученных семян по основным сортовым признакам, подтвердили типичность созданных семян во всех вариантах.

Выводы/Conclusions

Выявлена неоднородность семенных коробочек (плодов) по массе семени в пределах соцветий растений. Величина изменчивости массы семени между коробочками на соцветии у 3–9-коробочных растений оказалась наименьшей и составила 0,6–1,3 мг.

Исследования показали, что с увеличением массы семени от 3,8 до 5,4 мг наиболее значительно (или на 33,3%) происходило увеличение ширины семени, в наименьшей степени (или на 24,2%) — его длины.

Проведение сортирования (калибрования) их по размерным показателям позволило удалить из семенного материала фракций с пониженной массой и низкими значениями длины, ширины, и толщины семени в количестве от 82,5 до 85,0%.

Методы отбора по массе семени, размерным показателям и массе семени, а также по морфологическим признакам растений, размерным показателям и массе семени, описанные в методической части, позволили увеличить выходное количество созданных семян по сравнению с контролем.

Наиболее эффективным оказался отбор по размерным показателям и массе семени, который превзошел по выходу семян другие исследуемые методы отбора на 19,0–80,3%.

При всех обозначенных выше методах отбора получены семена с высокими посевными качествами и морфофизиологическими свойствами, в том числе с высокой силой роста семян.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные. Автор внес вклад в работу 100%. Автор принимал участие в написании рукописи и несет ответственность за плагиат. Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the presented data. The author contributed 100% to the work. The author participated in writing the manuscript and is responsible for plagiarism. The author declared no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Федерального научного центра лубяных культур по теме № FGSS-2024-0005.

FUNDING

The research was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Bast Crops on topic No. FGSS-2024-0005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Понажев В.П., Виноградова Е.Г. Развитие селекции и семеноводства льна-долгунца — важнейший ресурс повышения эффективности льноводства России. *Технические культуры*. 2022; (1): 30–39. <https://doi.org/10.54016/SVITOK.2022.71.55.004>
2. Янышина А.А., Павлова Л.Н., Фомина М.А. Однородность основных сортов признаков новых селекционных номеров и сортов льна-долгунца. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019; (3): 29–33. <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2019-28-3-29-33>
3. Янышина А.А., Понажев В.П. Динамика размножения сортовой примеси в семенах льна-долгунца в процессе репродукции их в питомниках первичного семеноводства. *Вестник аграрной науки*. 2019; (2): 54–59. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.2.54>
4. Виноградова Т.А., Кудряшова Т.А., Козьякова Н.Н. Характеристика сортов льна-долгунца различной селекции по комплексу признаков технологической ценности льносырья. *Достижения науки и техники АПК*. 2021; 35(5): 33–39. <https://elibrary.ru/ywfsns>
5. Понажев В.П., Виноградова Е.Г. Влияние методов отбора растений льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) на качество обновленных семян. *Аграрная наука*. 2023; (10): 111–115. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-111-115>
6. Пролетова Н.В. Биотехнологические методы — инструмент для создания новых генотипов льна, устойчивых к антракнозу. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2020; (3): 31–36. <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2020-32-3-31-36>
7. Caser M., Lovisolo C., Scariot V. The influence of water stress on growth, ecophysiology and ornamental quality of potted *Primula vulgaris* 'Heidy' plants. New insights to increase water use efficiency in plant production. *Plant Growth Regulation*. 2017; 83(3): 361–373. <https://doi.org/10.1007/s10725-017-0301-4>
8. Figueiredo N. et al. Elevated carbon dioxide and temperature effects on rice yield, leaf greenness, and phenological stages duration. *Paddy and Water Environment*. 2015; 13(4): 313–324. <https://doi.org/10.1007/s10333-014-0447-x>
9. Dmitriev A.A. et al. Gene expression profiling of flax (*Linum usitatissimum* L.) under edaphic stress. *BMC Plant Biology*. 2016; 16: 237. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0927-9>
10. Пакудин В.В., Лопатин Л.М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 1984; 19(4): 109–113.
11. Гончаров С.В., Карпачев В.В. О механизме извлечения ценности при коммерциализации селекционных достижений. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019; (2): 28–33. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/28-33>
12. Кузьмин В.Н., Мишуров Н.П., Моторин О.А., Подьяблонский П.А., Скрынникова М.В. Состояние развития селекции и семеноводства льна-долгунца. *Управление рисками в АПК*. 2021; (4): 66–75. <https://elibrary.ru/vohuqp>
13. Янышина А.А. Сортная идентификация партий семян льна-долгунца в первичном семеноводстве научно-исследовательских учреждений Российской Федерации. *Аграрная наука*. 2022; (7–8): 157–161. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-157-161>
14. Янышина А.А., Медведева О.В., Фомина М.А. Эффективность отбора растений и создания обновленных партий семян с высокими посевными и сортовыми качествами в первичном семеноводстве льна-долгунца. *Научное обеспечение производства прядильных культур: состояние, проблемы и перспективы. Сборник научных трудов. Тверь: Тверской государственный университет*. 2018; 137–140. <https://elibrary.ru/yxretz>
15. Ouyang W., Xiong D., Li G., Li X. Unraveling the 3D Genome Architecture in Plants: Present and Future. *Molecular Plant*. 2020; 13(12): 1676–1693. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.10.002>

REFERENCES

1. Ponazhev V.P., Vinogradova E.G. The development of selection and seed production of flax is the most important resource for improving the efficiency of flax growing in Russia. *Technical Crops*. 2022; (1): 30–39 (in Russian). <https://doi.org/10.54016/SVITOK.2022.71.55.004>
2. Yanyshina A.A., Pavlova L.N., Fomina M.A. Homogeneity of main variety signs of new selection numbers and varieties of flax. *Agrarian journal of Upper Volga region*. 2019; (3): 29–33 (in Russian). <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2019-28-3-29-33>
3. Yanyshina A.A., Ponazhev V.P. Dynamics of rogue propagation in fiber flax seeds in the process of reproduction them in primary seed breeding plots. *Bulletin of agrarian science*. 2019; (2): 54–59 (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.2.54>
4. Vinogradova T.A., Kudryashova T.A., Kozyakova N.N. Characteristics of fibre flax varieties of different breeding according to the complex of traits of the technological value of flax raw materials. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2021; 35(5): 33–39 (in Russian). <https://elibrary.ru/ywfsns>
5. Ponazhev V.P., Vinogradova E.G. Influence of methods of selection of fiber flax plants (*Linum usitatissimum* L.) on the quality of renewed seeds. *Agrarian science*. 2023; (10): 111–115 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-111-115>
6. Proletova N.V. Biotechnological methods are a tool for creating new flax genotypes resistant to anthracnose. *Agrarian journal of Upper Volga region*. 2020; (3): 31–36 (in Russian). <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2020-32-3-31-36>
7. Caser M., Lovisolo C., Scariot V. The influence of water stress on growth, ecophysiology and ornamental quality of potted *Primula vulgaris* 'Heidy' plants. New insights to increase water use efficiency in plant production. *Plant Growth Regulation*. 2017; 83(3): 361–373. <https://doi.org/10.1007/s10725-017-0301-4>
8. Figueiredo N. et al. Elevated carbon dioxide and temperature effects on rice yield, leaf greenness, and phenological stages duration. *Paddy and Water Environment*. 2015; 13(4): 313–324. <https://doi.org/10.1007/s10333-014-0447-x>
9. Dmitriev A.A. et al. Gene expression profiling of flax (*Linum usitatissimum* L.) under edaphic stress. *BMC Plant Biology*. 2016; 16: 237. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0927-9>
10. Pakudin V.V., Lopatin L.M. Assessment of ecological plasticity and stability of agricultural crop varieties. *Agricultural Biology*. 1984; 19(4): 109–113 (in Russian)
11. Goncharov S.V., Karpachev V.V. On value extraction mechanism during commercialization of selection breeding results. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019; (2): 28–33 (in Russian). <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/28-33>
12. Kuzmin V.N., Mishurov N.P., Motorin O.A., Podyablonsky P.A., Skrynnikova M.V. The state of development of selection and seed production of flax. *Agricultural Risk Management*. 2021; (4): 66–75 (in Russian). <https://elibrary.ru/vohuqp>
13. Yanyshina A.A. Varietal identification of flax seeds batches in primary seed breeding of the Russian Federation research institutions. *Agrarian science*. 2022; (7–8): 157–161 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-157-161>
14. Yanyshina A.A., Medvedeva O.V., Fomina M.A. The effectiveness of plant selection and the creation of updated batches of seeds with high sowing and varietal qualities in primary seed production. *Scientific support of spinning crop production: status, problems and prospects. Collection of scientific papers*. Tver: Tver State University. 2018; 137–140 (in Russian). <https://elibrary.ru/yxretz>
15. Ouyang W., Xiong D., Li G., Li X. Unraveling the 3D Genome Architecture in Plants: Present and Future. *Molecular Plant*. 2020; 13(12): 1676–1693. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.10.002>

16. Понажев В.П., Медведева О.В., Янышина А.А. Семеноводству льна-долгунца — современный уровень научного обеспечения. *Достижения науки и техники АПК*. 2016; 30(5): 58–60. <https://elibrary.ru/vzyetv>

ОБ АВТОРАХ

Наталья Николаевна Козьякова

аспирант

info.trk@fncl.k.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9220-5908>

AUTHOR ID 773867

Федеральный научный центр лубяных культур,
Комсомольский пр-т, 17/56, Тверь, 170041, Россия

16. Ponazhev V.P., Medvedeva O.V., Yanyshina A.A. Modern level of scientific support to fiber flax seed production. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2016; 30(5): 58–60 (in Russian). <https://elibrary.ru/vzyetv>

ABOUT THE AUTHORS

Natalya Nikolaevna Kozyakova

Postgraduate Student

info.trk@fncl.k.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9220-5908>

AUTHOR ID 773867

Federal Scientific Center for Bast Crops,
17/56 Komsomolsky Prospekt, Tver, 170041, Russia



VII АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ МОЛОКО РОССИИ



ТЕМЫ ФОРУМА:

КОРМОПРОИЗВОДСТВО
КОРМЛЕНИЕ КРС · ПЕРЕРАБОТКА МЯСА
КЛУБ ДИРЕКТОРОВ · ПЕРЕРАБОТКА МОЛОКА
КОРМОЗАГОТОВКА · ВЕТЕРИНАРИЯ
ЗООТЕХНИКА · КЛУБ СОБСТВЕННИКОВ
УПРАВЛЕНИЕ/ИННОВАЦИИ

**УЧАСТИЕ ДЛЯ СЕЛЬХОЗПРЕДПРИЯТИЙ
БЕСПЛАТНО!**



ВСЯ ИНФОРМАЦИЯ О МЕРОПРИЯТИИ И РЕГИСТРАЦИЯ НА WWW.IMOL.CLUB

СОХРАНЯЯ ТРАДИЦИИ, СОЗДАЁМ БУДУЩЕЕ!

УДК 631.582:633.174

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-105-112

В.С. Бударина ✉

А.Н. Астахов

Т.В. Астахова

К.А. Пронудин

Д.Д. Бабушкин

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Россия

✉ v.plaksina88@yandex.ru

Поступила в редакцию: 03.09.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Бударина В.С., Астахов А.Н., Астахова Т.В., Пронудин К.А., Бабушкин Д.Д.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-105-112

Vera S. Budarina ✉

Alexander N. Astashov

Tatiana V. Astashova

Kirill A. Pronudin

Denis D. Babushkin

Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russia

✉ v.plaksina88@yandex.ru

Received by the editorial office: 03.09.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Budarina V.S., Astashov A.N., Astashova T.V., Pronudin K.A., Babushkin D.D.

Биоэнергетическая эффективность короткороотационных севооборотов с включением позднеспелых культур в условиях аридного климата Нижнего Поволжья

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В связи с глобальными изменениями климата особый интерес представляет изучение вопроса повышения продуктивности севооборотов в условиях с неравномерным выпадением осадков в течение вегетационного периода. Выявить наиболее эффективные схемы севооборотов независимо от ценовой политики возможно с помощью биоэнергетической оценки. Включение засухоустойчивых поздних культур, способных восполнять потери урожая других культур в неблагоприятные годы, обеспечивает стабилизацию выхода продукции и повышает эффективность агроценозов.

Методы. Изучение эффективности включения в четырехпольный севооборот зернового сорго и кукурузы проведено на основе биоэнергетического анализа. По показателям суммы накопленной энергии с урожаем и затрат совокупной энергии на возделывание культур рассчитаны следующие показатели: прирост энергии, биологический коэффициент, энергетическая рентабельность и энергетическая себестоимость урожая. Математическая обработка результатов проведена методом дисперсионного анализа с помощью программы AGROS 2.09.

Результаты. В результате энергетического анализа выявлено, что включение пропашных культур в агроценозы значительно повышает эффективность использования пашни в условиях недостаточного увлажнения. В вариантах с насыщением севооборотов пропашными культурами установлены максимальный выход энергии с урожаем пар — озимая пшеница — соя — зерновое сорго (32,67 ГДж/га) и пар — озимая пшеница — соя — кукуруза (35,12 ГДж/га) при затратах совокупной энергии 11,16–11,35 ГДж/га. В этих вариантах прирост энергии составил 21,68–23,94 ГДж/га, энергетическая рентабельность — 194,33–211,12%, себестоимость энергии урожая — 0,39–0,41 ГДж/га, коэффициенты энергетической эффективности — 2,94–3,12. Корреляционный анализ выявил сильную положительную зависимость коэффициентов биоэнергетической эффективности севооборотов от гидротермических условий возделывания сельскохозяйственных культур, коэффициент корреляции между показателями составил 0,71–0,74. В остросушливые годы различия по эффективности севооборотов при разных чередованиях культур выражены сильнее, чем в средние и увлажненные.

Ключевые слова: севооборот, аридизация, эффективность, яровая пшеница, яровой ячмень, соя, сорго, кукуруза, биоэнергетический коэффициент

Для цитирования: Бударина В.С., Астахов А.Н., Астахова Т.В., Пронудин К.А., Бабушкин Д.Д. Биоэнергетическая эффективность короткороотационных севооборотов с включением позднеспелых культур в условиях аридного климата Нижнего Поволжья. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 105–112.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-105-112>

Bioenergetic efficiency of short-term crop rotations with the inclusion of late-ripening crops in the arid climate of the Lower Volga region

ABSTRACT

Relevance. Due to global climate changes, it is of particular interest to study the issue of increasing crop rotation productivity in conditions with uneven precipitation during the growing season. It is possible to identify the most effective crop rotation schemes, regardless of pricing policy, using bioenergy assessment. The inclusion of drought-resistant late crops capable of making up for crop losses of other crops in unfavorable years ensures the stabilization of output and increases the efficiency of agroecosystems.

Methods. The study of the effectiveness of the inclusion of grain sorghum and corn in the four-field crop rotation was carried out on the basis of bioenergetic analysis. The following indicators were calculated based on the amount of accumulated energy from the harvest and the cost of total energy for crop cultivation: energy gain, bioenergy coefficient, energy profitability and energy cost of harvest. The mathematical processing of the results was carried out by the method of variance analysis using the AGROS 2.09 program.

Results. As a result of the energy analysis, it was revealed that the inclusion of row crops in agroecosystems significantly increases the efficiency of using arable land in conditions of insufficient moisture. In the variants with saturation of crop rotations with row crops, the maximum energy output is set with a harvest of steam — winter wheat — soybeans — grain sorghum (32.67 GJ/ha) and steam — winter wheat — soybeans — corn (35.12 GJ/ha) at a total energy consumption of 11.16–11.35 GJ/ha. In these variants, the energy gain was 21.68–23.94 GJ/ha, the energy profitability was 194.33–211.12%, the cost of crop energy was 0.39–0.41 GJ/ha, and the energy efficiency coefficients were 2.94–3.12. Correlation analysis revealed a strong positive dependence of the coefficients of bioenergetic efficiency of crop rotations on the hydrothermal conditions of crop cultivation, the correlation coefficient between the indicators was 0.71–0.74. In acute arid years, differences in the efficiency of crop rotations with different crop alternations are more pronounced than in average and moistened ones.

Key words: crop rotation, aridization, efficiency, spring wheat, spring barley, soybeans, sorghum, corn, bioenergy coefficient

For citation: Budarina V.S., Astashov A.N., Astashova T.V., Pronudin K.A., Babushkin D.D. Bioenergetic efficiency of short-term crop rotations with the inclusion of late-ripening crops in the arid climate of the Lower Volga region. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 105–112 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-105-112>

Введение/Introduction

Проблема сохранения посевов и повышения урожайности сельскохозяйственных культур приобретает в последние годы особую актуальность в связи с резкими изменениями климата [1–5].

Тенденции устойчивого роста температуры воздуха прослеживаются при сравнении средних многолетних показателей за 2001–2018 гг. со стандартной климатической нормой. Средняя годовая температура воздуха изменялась по природным зонам от 5,1 до 6,8 °C, а за 18-летний период ее значения составляли от 6,2 до 7,8 °C, то есть увеличились на 1,0–1,1 °C. Однако основной вклад в рост годовой температуры воздуха вносят уже не зимние месяцы, а март, июль, август, сентябрь и ноябрь, причем наибольшее увеличение температуры воздуха (на 2,0–2,2 °C) на современном этапе наблюдается в августе [6, 7].

Прогнозируемые изменения климата приведут к увеличению частоты и интенсивности дестабилизирующих явлений в экосистемах. Одним из таких проявлений станет нерегулярный характер выпадения осадков, а также периоды экстремальной засухи [8, 9]. Данные стрессовые факторы влияют на урожайность сельскохозяйственных культур напрямую или через сложные взаимодействия со свойствами почвы, в том числе доступностью питательных веществ [10–12]. Глобальные климатические трансформации актуализируют исследования, направленные на увеличение продуктивности агроэкосистем в регионах, характеризующихся нестабильным режимом увлажнения в период вегетации культур.

В условиях рыночной экономики ассортимент выращиваемых растений главным образом определяется спросом на продукцию. Но в условиях недостаточной увлажненности внедрение засухоустойчивых поздних культур, способных компенсировать потери урожая других растений, играет ключевую роль в стабилизации общего объема производства. При этом в Саратовской области урожайность ранних яровых культур в среднем составляет 1,6–1,7 т/га, а сорго формирует 2,2–3,2 т/га зерна, по данным Министерства сельского хозяйства области. Увеличение видового разнообразия может повысить эффективность агроценозов за счет взаимодополняемости использования ресурсов. Устойчивость систем земледелия критически зависит от разнообразия культур [13, 14].

Использование в севооборотах несколько сельскохозяйственных растений с разными сроками обработки почвы, посева и уборки является необходимостью для своевременного выполнения сельскохозяйственных работ [15, 16]. Сочетание культур, сходных по направлению использования, но различных по своим реакциям на конкретные стрессовые факторы позволит повысить устойчивость агроэкосистем [17].

В работах многих ученых показан высокий уровень достоверности энергетической оценки

систем земледелия [18–20]. Данный подход обеспечивает количественную оценку эффективности производства независимо от колебаний цен на рынке [21]. Данный инструмент позволяет рассчитать энергозатраты, связанные с производством продукции, и оценить их окупаемость, а также провести сравнительный анализ агроэкосистем по показателю энергопотребления на каждую единицу выпускаемой продукции [22].

Оценка энергетической рентабельности агроценозов предполагает сопоставление суммарных энергетических ресурсов, затраченных на создание продукта, с объемом энергии, аккумулированной в полученном урожае. Использование энергетических эквивалентов обеспечивает более объективный и точный анализ, поскольку оценка сельскохозяйственного производства основывается на энергии, затраченной на единицу продукции, что исключает влияние ценовых колебаний [23, 24]. Биоэнергетические эквиваленты служат дополнением к экономической оценке технологий, не заменяя ее.

В аграрном секторе снижение совокупного энергопотребления в расчете на единицу произведенной продукции становится возможным благодаря применению ресурсосберегающих методик в процессе возделывания сельскохозяйственных культур. Внедрение инновационных технологий, ориентированных на рациональное использование ресурсов, является ключевым фактором повышения энергетической эффективности в сельскохозяйственном производстве.

Цель исследований — выявить эффективность включения позднеспелых культур в короткороционные севообороты на основе биоэнергетического анализа продуктивности агроценозов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Экспериментальные работы осуществляли с 2008 по 2019 год в южной микроне правобережья Саратовской области Российской Федерации на опытных участках Всероссийского научно-исследовательского и проектно-технологического института сорго и кукурузы (РосНИИСК «Россорго»).

Нижнее Поволжье является зоной рискованного земледелия, где влажные годы периодически чередуются с засушливыми или острозасушливыми. Сравнение долгосрочных средних температурных показателей с установленными климатическими стандартами выявляет ясно выраженную тенденцию к устойчивому увеличению температуры воздуха.

Для характеристики погодных условий использовали данные основной метеостанции НИИСХ Юго-Востока (г. Саратов). Метеорологические условия в ходе всего исследовательского периода отличались значительным разнообразием и воспроизводили весь диапазон климатических особенностей, свойственных указанной местности.

Анализ условий увлажнения в течение вегетационного периода культур за 12-летний период выявил следующие закономерности.

Благоприятные условия наблюдались в 2008, 2013 и 2017 годах, когда гидротермический коэффициент (ГТК) варьировал в пределах 1,04–1,20. В среднем за указанные годы количество выпавших осадков составило 326 мм, а суммарная активная температура достигла 2962 °С. Умеренными условиями увлажнения характеризовались 2009, 2014–2016, 2018 и 2019 годы, ГТК в диапазоне 0,6–0,9. В эти годы зарегистрировано 201 мм осадков с апреля по сентябрь, а сумма активных температур составила 3069 °С. Засушливые и жаркие условия сложились в 2010, 2011 и 2012 годах, что отразилось в низких значениях ГТК (0,25–0,49). Общее количество осадков за вегетационный период составило всего 125 мм, в то время как средняя сумма активных температур достигала 3352,4 °С.

Почва опытного поля представляет собой слабо-выщелоченный маломощный тяжелосуглинистый южный чернозем с низким содержанием гумуса. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 3,5–4,2%, гидролизующего азота — 10–15 мг, доступного фосфора — 2,4–12,0 мг, обменного калия — 21–32 мг, кальция — до 8 мг на 100 г почвы. Почва характерна для юго-восточных черноземных степей России.

Экспериментальную часть работ проводили в стационарном опыте. Объект исследований — короткоротационные севообороты, представленные в таблице 1.

Размещение делянок систематическое, повторность трехкратная. Норма высева, глубина заделки семян и агротехника возделывания культур соответствовали зональной технологии. В целях производства экологически безопасной сельскохозяйственной продукции в рамках севооборота было полностью исключено использование минеральных удобрений и гербицидов, что способствовало минимизации химической нагрузки на почву и растения.

При проведении экспериментальных работ использовали сорта сельскохозяйственных культур местной селекции, допущенных к возделыванию в Нижневолжском регионе: озимая пшеница (Левобережная 3), яровая мягкая пшеница (Саратовская 68), яровой ячмень (Нутанс 553), кукуруза (Радуга), сорго зерновое (Перспективный 1), соя (Соер 4).

Таблица 1. Схема стационарного опыта по изучению короткоротационных севооборотов

Table 1. Scheme of stationary experience in the study of short-rotation crop rotations

Варианты	Чередование культур
1	пар черный — озимая пшеница — соя — яровая мягкая пшеница
2	пар черный — озимая пшеница — соя — яровой ячмень
3	пар черный — озимая пшеница — соя — кукуруза
4	пар черный — озимая пшеница — соя — зерновое сорго

Питательную ценность зерна оценивали на основе биохимического анализа в соответствии со стандартами: содержание протеина (ГОСТ 10846-91¹), жира (ГОСТ 13496.15-97²), клетчатки (ГОСТ 31675-2012³), золы (ГОСТ 10847-2019⁴).

Биоэнергетическую оценку эффективности экспериментальных схем севооборотов проводили на основе полученного экспериментального материала согласно стандартным методикам⁵⁻⁷.

Валовую энергетическую ценность (ВЭ) основной продукции рассчитывали по формуле:

$$ВЭ = 0,23 \times \text{протеин} + 0,376 \times \text{жир} + 0,167 \times \text{клетчатка} + 0,174 \times БЭВ^8$$

По показателям суммы накопленной энергии с урожаем (Q) и затрат совокупной энергии на возделывание культур (ЕТ) рассчитывали следующие показатели: прирост энергии (ΔQ), биоэнергетический коэффициент (r), энергетическую рентабельность (R) и энергетическую себестоимость урожая (CQ).

Математическая обработка результатов исследований проведена методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием программы Microsoft Excel (США) и пакета программ статистического и биометрико-генетического анализа в растениеводстве и селекции AGROS (версия 2.09)⁹.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Для биоэнергетической оценки изучаемых севооборотов был проведен биохимический анализ зерна возделываемых культур, определено содержание сырого протеина, жира, клетчатки, золы и БЭВ (рис. 1).

На основании содержания основных питательных веществ в зерне культур рассчитан выход

¹ ГОСТ 10846-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка.

² ГОСТ 32905-2014 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания сырого жира (ISO 6492:1999, MOD).

³ ГОСТ 31675-2012 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации.

⁴ ГОСТ 10847-2019 Зерно. Определение зольности.

⁵ Жученко А.А., Афанасьев В.Н. Энергетический анализ в сельском хозяйстве. Кишинев. 1988; 70.

⁶ Посыпанов Г.С., Долгодворов В.Е. Методика энергетической оценки эффективности технологического приема, культуры, сорта. М.: МСХА. 1995; 22.

⁷ Биоэнергетическая оценка севооборотов: метод, рекомендации. Новосибирск: РАСХН. Сибирское отделение. СибНИИСХ. 1993; 36.

⁸ Вафина Э.Ф., Сутыгин П.Ф. Энергетическая оценка эффективности приемов технологий возделывания полевых культур. 2016; 62.

⁹ Мартынов С.П. Пакет программ статистического и биометрико-генетического анализа в растениеводстве и селекции AGROS (версия 2.09). Тверь, 1999.

валовой энергии с урожаем основной продукции севооборотов. Наибольший аккумулированный объем валовой энергии отмечается у пропашных культур, а также у озимой пшеницы. В ходе исследований получены следующие средние значения: кукуруза — 56,62 ГДж/га, зерновое сорго — 46,80 ГДж/га, озимая пшеница — 50,51 ГДж/га. У сои наблюдается некоторое снижение выхода суммарной энергии, составляющее 33,36 ГДж/га. Самые низкие показатели характерны для ранних яровых культур: яровой ячмень — 26,05 ГДж/га, яровая пшеница — 27,72 ГДж/га.

При рассмотрении результатов исследования по годам отмечается существенная разница в показателях (рис. 2).

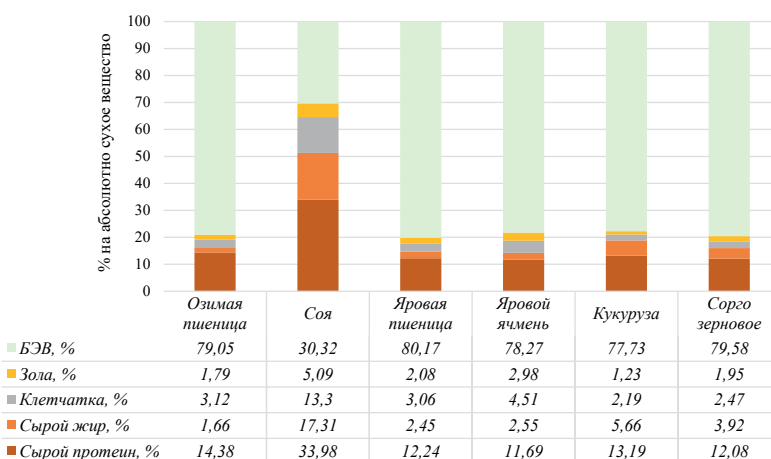
Максимальный выход валовой энергии отмечен в благоприятные годы (2008-й, 2013-й и 2017-й) на всех культурах севооборота (рис. 2). У озимой пшеницы содержание валовой энергии составило 55,22–104,51 ГДж/га, у ранних яровых — 26,27–54,93 ГДж/га, у сои — 32,21–67,19 ГДж/га, у зернового сорго — 52,78–81,43 ГДж/га, у кукурузы — 71,13–95,64 ГДж/га.

В средние годы (2009, 2014–2016, 2018–2019 гг.) показатели несколько ниже. Выход валовой энергии с 1 га изменялся у озимой пшеницы в пределах 33,35–68,93 ГДж, у сои — 11,74–59,60 ГДж, у яровой пшеницы — 14,44–34,98 ГДж, у ярового ячменя — 11,21–37,29 ГДж, у кукурузы — 41,60–71,54 ГДж, у зернового сорго — 34,31–61,64 ГДж. Низкий выход валовой энергии отмечен в годы с недостаточным увлажнением (2010–2012 гг.) у всех культур севооборота. Однако даже в острозасушливые годы кукуруза и зерновое сорго обеспечили выход валовой энергии выше ранних яровых культур: яровая пшеница — 5,52–19,62 ГДж/га, яровой ячмень — 6,43–21,68 ГДж/га, соя — 5,52–29,68 ГДж/га, озимая пшеница — 9,27–25,76 ГДж/га, зерновое сорго — 24,32–36,00 ГДж/га, кукуруза — 27,41–40,44 ГДж/га.

В рамках изучаемых схем чередования культур суммарный объем энергии, полученной с урожаем, в среднем за период проведения исследований варьировал от 27,48 до 35,12 ГДж/га (табл. 2).

Рис. 1. Биохимический состав зерна с.-х. культур, 2008–2019 гг.

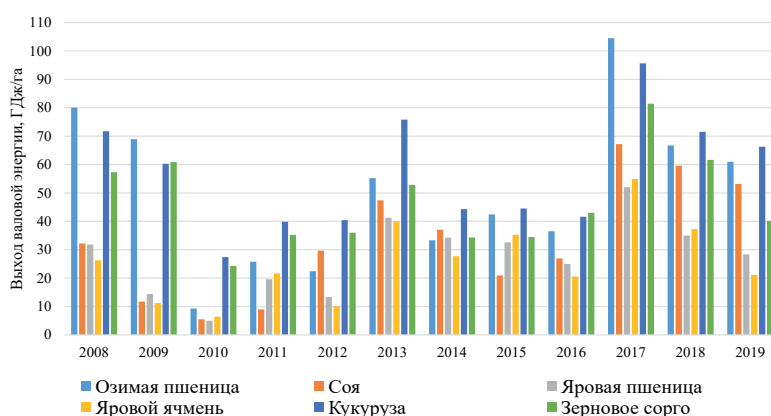
Fig. 1. Biochemical composition of grain of agricultural crops, 2008–2019



HCP_{05} (протейн) = 2,36 HCP_{05} (жир) = 0,40 HCP_{05} (клетчатка) = 0,41 HCP_{05} (зола) = 0,44 HCP_{05} (БЭВ) = 2,53

Рис. 2. Выход валовой энергии с урожаем культур в экспериментальном севообороте, 2008–2019 гг.

Fig. 2. Gross energy output with crop yield in the experimental crop rotation, 2008–2019



$HCP_{0,05} = 7,761$

Таблица 2. Биоэнергетическая эффективность четырехпольных севооборотов, 2008–2019 гг.

Table 2. Bioenergetic efficiency of four-field crop rotations, 2008–2019

Показатель	Вариант опыта*				HCP_{05}
	1	2	3	4	
Выход зерна, т/га	1,42	1,40	1,77	1,67	0,085
Сумма накопленной энергии (Q), ГДж/га	27,90	27,48	35,12	32,67	1,621
Затраты совокупной энергии (E_T)	10,70	10,62	11,35	11,16	0,08
Прирост энергии (ΔQ), ГДж/га	17,37	17,63	23,94	21,68	–
Биоэнергетический коэффициент (r)	2,61	2,59	3,12	2,94	0,135
Энергетическая рентабельность (R), %	162,31	160,36	211,12	194,33	–
Себестоимость энергии урожая (C_0), ГДж/га	0,53	0,52	0,39	0,41	0,103

Примечание: 1. Пар — озимая пшеница — соя — яровая пшеница. 2. Пар — озимая пшеница — соя — яровой ячмень. 3. Пар — озимая пшеница — соя — кукуруза. 4. Пар — озимая пшеница — соя — сорго зерновое.

Максимальные значения получены при следующих схемах ротации культур: пар — озимая пшеница — соя — зерновое сорго — 32,67 ГДж/га и пар — озимая пшеница — соя — кукуруза — 35,12 ГДж/га при затратах совокупной энергии 11,16–11,35 ГДж/га соответственно. В этих вариантах прирост энергии составил 21,68–23,94 ГДж/га,

энергетическая рентабельность — 194,33–211,12%, себестоимость энергии урожая — 0,39–0,41 ГДж/га.

В вариантах с включением яровой пшеницы и ячменя биоэнергетическая эффективность ниже, сумма накопленной энергии — 27,48–27,90 ГДж/га при затратах 10,62–10,70 ГДж/га, прирост энергии — 17,37–17,63 ГДж/га, энергетическая рентабельность — 160,36–162,31%, себестоимость энергии урожая — 0,52–0,53 ГДж/га.

В ходе многолетних исследований показатели биоэнергетической эффективности варьировали в диапазоне от 2,59 до 3,12 (рис. 3). Максимальные значения отмечены в агросистемах, включающих культуры позднего срока посева: при включении зернового сорго коэффициент составил 2,94, кукурузы — 3,12. Менее продуктивными с точки зрения биоэнергетики оказались варианты с ранними яровыми культурами, где соответствующие коэффициенты находились в пределах 2,59–2,61.

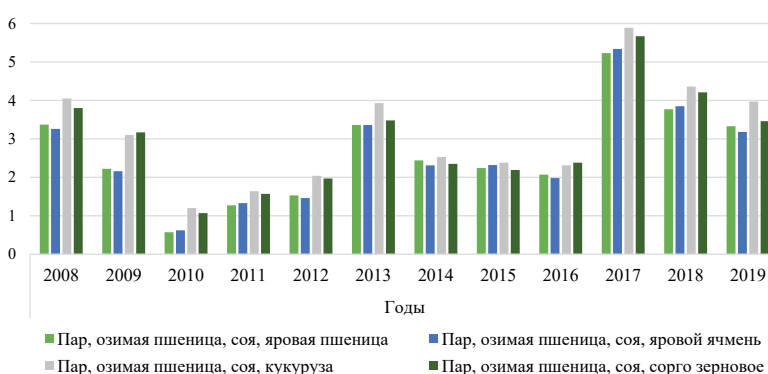
Статистический анализ продемонстрировал выраженную положительную зависимость коэффициентов биоэнергетической эффективности схем севооборотов от гидротермических параметров вегетационного периода культур. Коэффициент корреляции, характеризующий данную зависимость, варьируется в диапазоне от 0,71 до 0,74. Это свидетельствует о том, что более благоприятные гидротермические условия, такие как оптимальное сочетание температуры и влажности, оказывают существенное влияние на повышение биоэнергетической эффективности севооборотов.

Эта выраженная взаимосвязь визуализирована на рисунке 4 и подкрепляется уравнением линейной регрессии, а также коэффициентом аппроксимации. Последний изменялся от 0,5082 в случае включения зернового сорго в севооборот до 0,5617 при включении яровой пшеницы.

Хотя биоэнергетическая оценка независима от цен, высокая энергоэффективность включения сорго и кукурузы в структуру посевных площадей в условиях недостаточного увлажнения подтверждается экономической выгодой для фермеров, особенно в засушливые годы. При этом уровень экономической эффективности изучаемых схем севооборотов с насыщением пропашными культурами возрастает до 126–132%,

Рис. 3. Биоэнергетические коэффициенты (r) в севооборотах

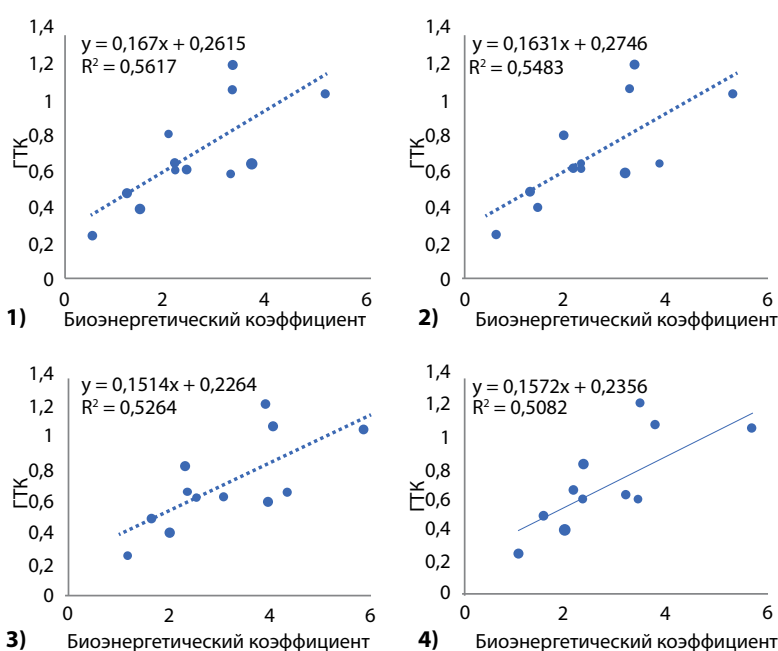
Fig. 3. Bioenergetic coefficients (r) in crop rotations



$HCP_{0,05}=0,135$

Рис. 4. Зависимость биоэнергетических коэффициентов от погодных условий: 1) пар — озимая пшеница — соя — яровая пшеница; 2) пар — озимая пшеница — соя — яровой ячмень; 3) пар — озимая пшеница — соя — кукуруза; 4) пар — озимая пшеница — соя — зерновое сорго

Fig. 4. Dependence of bioenergy coefficients on weather conditions: 1) steam — winter wheat — soybeans — spring wheat; 2) steam — winter wheat — soybeans — spring barley; 3) steam — winter wheat — soybeans — corn; 4) steam — winter wheat — soybeans — grain sorghum



при рентабельности зернопаровых севооборотов — 107–117% [25].

В засушливых условиях Оренбургской области проводили исследования на многолетнем стационарном опыте Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН, направленные на определение перспективных севооборотов с различным насыщением позднеспелыми культурами, такими как кукуруза, просо, сорго и др. Выявлено, что в биоэнергетическом плане посевы кукурузы и сорго эффективны в севооборотах. Самый высокий энергетический коэффициент (1,98–2,37) отмечается у них за счет накопления большого количества энергии в продукции [26].

Выводы/Conclusions

Использование поздних культур, устойчивых к засухе, может быть ключевым для обеспечения продовольственной безопасности в регионах с аридным климатом. Тот факт, что энергетическая оценка всех изучаемых севооборотов показала их высокую эффективность, говорит о перспективности данного подхода. Яровые посевы сильнее зависят от количества влаги, доступной в течение вегетации, и в годы с острой засухой не могут давать удовлетворительные урожаи. Ранние яровые культуры сильнее зависят от количества влаги, доступной в течение вегетации, и в годы с острой засухой не могут давать удовлетворительные урожаи.

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 тематического плана ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы» согласно госзаданиям № АААА-А19-119041190006-4 и № 124020300051-4 Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магомедтагиров А.А. Агроклиматическое обоснование севооборотов в интенсивном и биологизированном земледелии. *Современные векторы развития науки. Сборник статей по материалам Ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 32–34. <https://elibrary.ru/drlgqg>
2. Фитишин К.Р. Влияние климатических изменений на урожайность основных сельскохозяйственных культур. *Инновационные технологии в науке и образовании. Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции*. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «ДГТУ-ПРИНТ». 2024; 119–122. <https://doi.org/10.23947/itse.2024.119-122>
3. Зейналов А.С., Орел Д.С. Адаптационные возможности и изменения в биоэкологии *Cydia pomonella* L. в Центральном районе Нечерноземной зоны России на фоне глобального потепления. *Аграрная наука*. 2023; (6): 89–95. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-89-95>
4. Жазылбек Л.И., Несипбеков Е.Н. Влияние изменения климата на устойчивость культурных растений в условиях Казахстана. *Мировая глобализация: фундаментальные и прикладные аспекты: сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции*. М.: Экономическое образование. 2024; 173–178. <https://elibrary.ru/roekpv>
5. Рябцева Н.А. Влияние климатических факторов на действие регуляторов роста в агроценозах ярового ячменя. *Аграрная наука*. 2024; (10): 117–121. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-117-121>
6. 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://www.doi.org/10.17513/use.37206>
7. Губарев Д.И., Левицкая Н.Г., Деревягин С.С. Влияние изменений климата на деградацию почв в аридных зонах Поволжья. *Аридные экосистемы*. 2022; 28(1): 20–27. <https://www.doi.org/10.24412/1993-1939-3916-2022-1-20-27>
8. Huang Y., Gerber S., Huang T., Lichstein J.W. Evaluating the drought response of CMIP5 models using global gross primary productivity, leaf area, precipitation, and soil moisture data. *Global Biogeochemical Cycles*. 2016; 30(12): 1827–1846. <https://www.doi.org/10.1002/2016GB005480>
9. Варданян Т.Г. Глобальное изменение климата и водное хозяйство Армении. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2017; (1): 18–36. <https://www.elibrary.ru/yhvdcr>

Энергетическая оценка эффективности изучаемых севооборотов показала, что для стабилизации биоэнергетической эффективности в условиях аридизации климата Нижнего Поволжья рекомендуется замещать в короткоротационных севооборотах не менее 25% площадей под ранние яровые культуры на позднеспелые, такие как кукуруза и зерновое сорго. В зернопаропропашных севооборотах выявлены максимальные коэффициенты энергетической эффективности — 2,94–3,12. Включение только ранних яровых культур менее эффективно, коэффициенты энергетической эффективности 2,59–2,61.

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.

FINANCING

The research was carried out within the framework of the thematic plan of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn" in accordance with state assignment No. АААА-А19-119041190006-4 and No. 124020300051-4 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Magomedtagirov A.A. Agroclimatic justification for crop rotation in intensive and biologized agriculture. *Modern vectors of scientific development. A collection of articles based on the materials of the Annual scientific and practical conference of teachers on the results of research in 2023*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 32–34 (in Russian). <https://elibrary.ru/drlgqg>
2. Fitiushin K.R. The impact of climate change on the yield of major agricultural crops. *Innovative technologies in science and education. Collection of scientific papers of the XII International scientific and practical conference*. Rostov-on-Don: Limited Liability Company "DSTU-PRINT". 2024; 119–122 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/itse.2024.119-122>
3. Zeynalov A., Orel D.S. Adaptation possibilities and changes in the bioecology of *Cydia pomonella* L. in the central region of the non-black soil zone of Russia on the background of global warming. *Agrarian science*. 2023; (6): 89–95 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-89-95>
4. Zhazylbek L.I., Nesipbekov E.N. The Impact of Climate Change on the Resilience of Cultivated Plants in Kazakhstan. *World Globalization: Fundamental and Applied Aspects: A Collection of Scientific Papers Based on the Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Economic Education. 2024; 173–178 (in Russian). <https://elibrary.ru/roekpv>
5. Ryabtseva N.A. The influence of climatic factors on the effect of growth regulators in agrocenoses of spring barley. *Agrarian science*. 2024; (10): 117–121 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-117-121>
6. 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://www.doi.org/10.17513/use.37206>
7. Gubarev D.I., Levitskaya N.G., Derevyagin S.S. Influence of Climate Change on Soil Degradation in Arid Zones of the Volga Region. *Arid Ecosystems*. 2022; 12(1): 15–21. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010061>
8. Huang Y., Gerber S., Huang T., Lichstein J.W. Evaluating the drought response of CMIP5 models using global gross primary productivity, leaf area, precipitation, and soil moisture data. *Global Biogeochemical Cycles*. 2016; 30(12): 1827–1846. <https://www.doi.org/10.1002/2016GB005480>
9. Vardanyan T.G. Global climate change and water economy of Armenia. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya i geoekologiya*. 2017; (1): 18–36 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yhvdcr>

10. Faucon M.P., Houben D., Lambers H. Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. *Trends Plant Sci.* 2017 May; 22(5): 385–394. DOI: 10.1016/j.tplants.2017.01.005. Epub 2017 Feb 14. PMID: 28209328
11. Mariotte P. *et al.* Plant-Soil Feedback: Bridging Natural and Agricultural Sciences. *Trends in Ecology & Evolution.* 2018; 33(2): 129–142. <https://www.doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.005>
12. Schimel J.P. Life in Dry Soils: Effects of Drought on Soil Microbial Communities and Processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics.* 2018; 49: 409–432. <https://www.doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062614>
13. Plaxina V.S., Astashov A.N., Bochkareva Ju.V., Azizov Z.M., Safronov A.A. Improvement of the ecological sustainability of short-term rotation under the aridization conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022; 949: 012135. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012135>
14. Toigildin A., Morozov V., Podsevalov M., Toigildina I., Ayupov D. Ecological role of crop rotation in the efficient use of agricultural territories of the forest-steppe zone of the Volga region. *E3S Web of Conferences.* 2020; 208: 01014. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202020801014>
15. Zeleney A.V., Chamurliov O.G., Laptina Yu.A., Gubina L.V., Romenskaya O.N., Feofilova L.A. Effectiveness of biologization predecessors and methods in increasing grain crops productivity and field crop rotations productivity in Nizhne Povolzhje region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021; 843: 012024. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/843/1/012024>
16. Степных Н.В., Нестерова Е.В., Заргарян А.М., Копылова С.А. Стратегическое значение диверсификации растениеводства. *Земледелие.* 2022; (2): 7–13. <https://www.elibrary.ru/dnrbgb>
17. Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П., Емельянов А.В., Скрипникова Е.В. Адаптации в сельском хозяйстве и иммунитет сельскохозяйственных культур к болезням и вредителям. *Аграрная наука.* 2019; (2): 24–28. <https://www.doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-24-28>
18. Азизов З.М., Архипов В.В., Имашев И.Г. Эффективность производства зерна в севооборотах засушливой степи Нижнего Поволжья. *Аграрный научный журнал.* 2021; (2): 4–8. <https://www.doi.org/10.28983/asj.y2021i2pp4-8>
19. Широков Ю.А. Анализ перспектив энергоэкономической оценки агротехнологий. *Агроинженерия.* 2021; (4): 46–52. <https://www.doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-46-52>
20. Беляк В.Б., Тимошкин О.А. Совершенствование набора культур и структуры кормовых угодий для мясного скота в лесостепной зоне. *Международный сельскохозяйственный журнал.* 2019; (1): 49–52. <https://www.doi.org/10.24411/2587-6740-2019-11013>
21. Ткачук О.А., Павликова Е.В. Сравнительная оценка энергетической эффективности агротехнических приемов в полевых севооборотах лесостепи Среднего Поволжья. *Современные проблемы науки и образования.* 2015; (1–1): 1690. <https://www.elibrary.ru/vifdcf>
22. Мамедова Ш.А. Биоэнергетическая и экономическая эффективность выращивания бобовых растений. *Бюллетень науки и практики.* 2021; 7(1): 98–106. <https://www.doi.org/10.33619/2414-2948/62/10>
23. Ткачук О.А., Орлов А.Н., Павликова Е.В. Совершенствование элементов технологии возделывания яровой пшеницы, обеспечивающих снижение энергетических затрат и повышение урожайности на черноземных почвах лесостепи Поволжья. *Нива Поволжья.* 2012; (2): 40–45. <https://www.elibrary.ru/punxh>
24. Барановский А.В., Тимошин Н.Н., Курдюкова О.Н. Энергетическая эффективность возделывания сорго и других зерновых культур в Донбассе. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН.* 2024; 26(5): 147–159. <https://www.elibrary.ru/orwtrk>
25. Плаксина В.С., Родина Т.В., Киреева О.В. Повышение рентабельности за счет возделывания кормовых культур в агроценозах. Селекция сельскохозяйственных растений и совершенствование технологии их возделывания. *Материалы Международной научно-практической конференции.* Иркутск: Иркутский ГАУ. 2024; 111–115. <https://www.elibrary.ru/tjwokd>
26. Митрофанов Д.В. Агроэкономическая и биоэнергетическая оценка шестипольных севооборотов в засушливых условиях Оренбургской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2019; (2): 20–24. <https://www.elibrary.ru/odznxo>
10. Faucon M.P., Houben D., Lambers H. Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. *Trends Plant Sci.* 2017 May; 22(5): 385–394. DOI: 10.1016/j.tplants.2017.01.005. Epub 2017 Feb 14. PMID: 28209328
11. Mariotte P. *et al.* Plant-Soil Feedback: Bridging Natural and Agricultural Sciences. *Trends in Ecology & Evolution.* 2018; 33(2): 129–142. <https://www.doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.005>
12. Schimel J.P. Life in Dry Soils: Effects of Drought on Soil Microbial Communities and Processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics.* 2018; 49: 409–432. <https://www.doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062614>
13. Plaxina V.S., Astashov A.N., Bochkareva Ju.V., Azizov Z.M., Safronov A.A. Improvement of the ecological sustainability of short-term rotation under the aridization conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022; 949: 012135. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012135>
14. Toigildin A., Morozov V., Podsevalov M., Toigildina I., Ayupov D. Ecological role of crop rotation in the efficient use of agricultural territories of the forest-steppe zone of the Volga region. *E3S Web of Conferences.* 2020; 208: 01014. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/202020801014>
15. Zeleney A.V., Chamurliov O.G., Laptina Yu.A., Gubina L.V., Romenskaya O.N., Feofilova L.A. Effectiveness of biologization predecessors and methods in increasing grain crops productivity and field crop rotations productivity in Nizhne Povolzhje region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021; 843: 012024. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/843/1/012024>
16. Stepanykh N.V., Nesterova E.V., Zargaryan A.M., Kopylova S.A. Strategic importance of crop production diversification. *Zemledelie.* 2022; (2): 7–13 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/dnrbgb>
17. Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P., Yemelyanov A.V., Skripnikova E.V. Adaptations in agriculture and immunity of agricultural cultures to diseases and pests. *Agrarian science.* 2019; (2): 24–28 (in Russian). <https://www.doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-24-28>
18. Azizov Z.M., Arkhipov V.V., Imashev I.G. Efficiency of grain production in crop rotations of the dry steppe of the Lower Volga region. *Agrarian Scientific Journal.* 2021; (2): 4–8 (in Russian). <https://www.doi.org/10.28983/asj.y2021i2pp4-8>
19. Shirokov Yu.A. Analysis of the prospects of energy-economic assessment of agricultural technologies. *Agricultural Engineering.* 2021; (4): 46–52 (in Russian). <https://www.doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-46-52>
20. Belyak V.B., Timoshkin O.A. Improving the mix of cultures and structures forage lands for beef cattle in the forest-steppe zone. *International Agricultural Journal.* 2019; (1): 49–52 (in Russian). <https://www.doi.org/10.24411/2587-6740-2019-11013>
21. Tkachuk O.A., Pavlikova E.V. Comparative assessment of energy efficiency agrotechnical methods in crop rotation steppe Middle Volga. *Modern problems of science and education.* 2015; (1–1): 1690 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/vifdcf>
22. Mammadova Sh.A. Energy and economic efficiency of cultivation of legumes. *Bulletin of Science and Practice.* 2021; 7(1): 98–106 (in Russian). <https://www.doi.org/10.33619/2414-2948/62/10>
23. Tkachuk O.A., Orlov A.N., Pavlikova E.V. Improving the elements of spring wheat cultivation technology that reduce energy costs and increase yields on chernozem soils of the forest-steppe of the Middle Volga region. *Niva Povolzhya.* 2012; (2): 40–45 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/punxh>
24. Baranovsky A.V., Timoshin N.N., Kurdyukova O.N. Energy efficiency of sorghum and other grain crops cultivation in Donbass. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2024; 26(5): 147–159 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/orwtrk>
25. Plaksina V.S., Rodina T.V., Kireeva O.V. Increasing profitability by cultivating forage crops in agroecosystems. *Breeding of agricultural plants and improvement of their cultivation technology. Proceedings of the International scientific and practical conference.* Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University. 2024; 111–115 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/tjwokd>
26. Mitrofanov D.V. Agro-economic and bioenergetic assessment of six-field crop rotation under arid conditions of Orenburg region. *Izvestia Orenburg State Agrarian University.* 2019; (2): 20–24 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/odznxo>

ОБ АВТОРАХ

Вера Сергеевна Бударина

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
v.plaksina88@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1808-8974>

Александр Николаевич Асташов

кандидат сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник
alex-astashov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2744-9428>

Татьяна Владимировна Асташова

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник
rodina008@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6670-417x>

Кирилл Алексеевич Пронудин

научный сотрудник
pronudin.kirill@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9760-6732>

Денис Дмитриевич Бабушкин

младший научный сотрудник
denchik241088@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3520-9376>

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы,
1-й Институтский проезд, 4, Саратов, 410050, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Vera Sergeevna Budarina

Candidate of Agricultural Sciences,
Chief Researcher
v.plaksina88@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1808-8974>

Alexander Nikolaevich Astashov

Candidate of Agricultural Sciences,
Senior Researcher
alex-astashov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2744-9428>

Tatiana Vladimirovna Astashova

Candidate of Agricultural Sciences,
Leading Researcher
rodina008@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6670-417x>

Kirill Alekseevich Pronudin

Research Associate
pronudin.kirill@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9760-6732>

Denis Dmitrievich Babushkin

Junior Research
denchik241088@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3520-9376>

Russian Research, Design and Technology Institute of
Sorghum and Corn,
4 1st Institute Passage, Saratov, 410050, Russia

ПРО ЯБЛОКО

**ЗДЕСЬ ФОРМИРУЕТСЯ БУДУЩЕЕ
РОССИЙСКОГО САДОВОДСТВА**

9-11 июня 2026

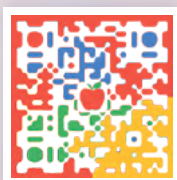
МВЦ «МинводыЭКСПО»



ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПОДРОБНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ
О ВЫСТАВКЕ >



УДК 633.161:631.52

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-113-121

К.Н. Горюнов ✉

А.А. Регидин

Н.С. Кравченко

Аграрный научный центр «Донской»,
Зерноград, Ростовская обл., Россия✉ goryunovkirill@yandex.ru

Поступила в редакцию: 20.08.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Горюнов К.Н., Регидин А.А.,
Кравченко Н.С.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-113-121

Kirill N. Goryunov ✉

Andrey A. Regidin

Nina S. Kravchenko

Agricultural Research Center
“Donskoy”, Zernograd, Rostov region,
Russia✉ goryunovkirill@yandex.ru

Received by the editorial office: 20.08.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© Goryunov K.N., Regidin A.A.,
Kravchenko N.S.

Изучение хозяйственно ценных признаков образцов коллекционного питомника люцерны в условиях Ростовской области

РЕЗЮМЕ

Ввиду изменяющихся погодно-климатических условий обновление сортового состава сельскохозяйственных культур (в частности, люцерны) для обеспечения сельхозтоваропроизводителей новыми, высокоурожайными и адаптированными сортами является актуальной задачей. Изучение исходного материала — первостепенный этап селекционного процесса.

Цели исследований — комплексное изучение образцов коллекционного питомника люцерны и выявление наиболее ценных для дальнейшего селекционного процесса в качестве исходного материала.

Исследования проводили в 2022–2024 гг. на полях ФГБНУ «АНЦ “Донской”». Объектом исследований были 54 образца люцерны местной селекции, 6 образцов инорайонной и зарубежной селекции. Проанализированы и выделены образцы, превышавшие стандарт Ростовская 90, по основным хозяйственно ценным признакам (урожайности зеленой массы сена, высоте растений, облиственности, содержанию сухого вещества и сырого протеина). Проведен корреляционный анализ между изучаемыми признаками, выделены значимые связи. По результатам комплексного изучения были выделены образцы люцерны с рядом полезных для последующей селекции признаков и свойств. Образец СГЛ 151, превосходивший стандартный сорт по комплексу показателей, будет использован в качестве исходного материала для создания новых высокоурожайных сортов с хорошим качеством корма.

Ключевые слова: люцерна, исходный материал, высота растений, кормовая продуктивность, облиственность, сухое вещество, сырой протеин

Для цитирования: Горюнов К.Н., Регидин А.А. Кравченко Н.С. Изучение хозяйственно ценных признаков образцов коллекционного питомника люцерны в условиях Ростовской области. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 113–121. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-113-121>

Study of economically valuable traits of alfalfa collection nursery samples in the Rostov region

ABSTRACT

Due to changing weather and climatic conditions, updating the varietal composition of agricultural crops (in particular, alfalfa) to provide agricultural producers with new, high-yielding and adapted varieties is an urgent task. The study of the source material is the primary stage of the breeding process.

The research objectives are a comprehensive study of alfalfa collection nursery samples and the identification of the most valuable for the further breeding process as a source material.

The studies were conducted in 2022–2024 in the fields of the “Donskoy” Scientific Research Center. The object of the research were 54 local alfalfa samples, 6 samples of foreign and local selection. The samples that exceeded the Rostovskaya 90 standard were analyzed and selected for the main economically valuable characteristics (yield of green hay mass, plant height, foliage, dry matter and crude protein content). A correlation analysis was conducted between the studied features, significant connections were identified. Based on the results of the comprehensive study, alfalfa samples with a number of useful features and properties for subsequent selection were identified. Sample SGL 151, which surpassed the standard variety in a set of indicators, will be used as the source material for creating new high-yielding varieties with good feed quality.

Key words: alfalfa, feedstock, feed productivity, foliage, dry matter, crude protein

For citation: Goryunov K.N., Regidin A.A., Kravchenko N.S. Study of economically valuable traits of alfalfa collection nursery samples in the Rostov region. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 113–121 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-113-121>

Введение/Introduction

Люцерна считается королевой кормовых культур благодаря высокому содержанию белка и питательной ценности [1–3]. Среди большого многообразия многолетних бобовых трав люцерна чаще всего занимает ведущее место вследствие ее высокоурожайности, многоукосности и мультинаправленности (зеленый корм, силос, сено, сенаж, сенная мука) [4–7]. Помимо этого, люцерна является отличным предшественником для зерновых культур, а также способствует рассолению и повышению плодородия почв [8–10].

Выращивание люцерны в условиях зоны рискованного земледелия, которой является Ростовская область в отсутствии осадков, снежного покрова, частых засух, высоких температур, представляет собой серьезную угрозу для продовольственной безопасности [11]. Селекционерам необходимо изучать сортовой состав кормовых трав и адаптировать его к изменяющимся погоднo-климатическим условиям, что обеспечит устойчивость к температурам и условиям возделывания [12–14].

Для повышения качества кормов и их производства большое значение имеет внедрение новых адаптивных и продуктивных сортов люцерны [15–17]. Качество корма из люцерны зависит от подбора сорта, облиственности, высоты растений, стадии развития растений. Высота растения служит индикатором морфологической структуры и физиологической функции растения. Она является ключевым фактором, определяющим поглощение растениями световой энергии, фотосинтез и распределение питательных веществ, играя таким образом решающую роль в урожайности и качестве продукции [18].

Листья люцерны богаты белком, минеральными веществами, микроэлементами и из общей кормовой массы обладают наибольшей питательной ценностью [19]. Сено из люцерны богато питательными веществами, в том числе белками, минералами, витаминами, и используется в качестве сырья для продуктов глубокой переработки, таких как травяная мука и травяные гранулы [20, 21].

Показателем качества кормовой массы у сорта являются высокое содержание протеина и низкое содержание сырой клетчатки, что сказывается на переваримости питательных веществ [22].

Создание новых сортов с интересующими сельхозтоваропроизводителей свойствами — первоочередная задача селекционеров [23–27].

Основные методы селекционного процесса — исследование и подбор исходного материала, первоочередным источником которого являются коллекционные питомники [28–30].

Посев и изучение коллекционных питомников, которые включают в себя многообразие сортов отечественной и зарубежной селекции, позволяют многосторонне анализировать образцы культур и эффективнее использовать выделившиеся по комплексу признаков в селекционном процессе.

Цели исследований — комплексное изучение некоторых образцов коллекционного питомника люцерны по ряду хозяйственно ценных признаков в условиях Ростовской области и выявление образцов с полезными для дальнейшего селекционного процесса признаками в качестве исходного материала.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования коллекционного питомника проводили в южной части Ростовской области на полях селекционного севооборота ФГБНУ «АНЦ «Донской»» в 2022–2024 гг.

Объектом изучения послужили 7 сортов мировой коллекции люцерны, полученные из ВИГРР им. Н.И. Вавилова (США, Канада, Латвия, Франция), и 53 образца селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской»» и других научных учреждений (Россия) (табл.1).

Таблица 1. Сорта и образцы коллекционного питомника люцерны, 2022–2024 г.

Table 1. Varieties and specimens of the alfalfa collection nursery, 2022–2024

	Сорт (образец)	Разновидность	Страна (оригинатор)
1	Ростовская 90, ст.	varia	АНЦ «Донской»
2	Павловская 7	varia	Россия
3	Павловская	varia	Россия
4	Воронежская 6	varia	Россия
5	Елена	varia	Россия
6	Татьяна	varia	Россия
7	Кевсала	varia	Россия
8	Timbale	sativa	Франция
9	Отбор 417	varia	АНЦ «Донской»
10	Отбор 72 ЛСП 430	varia	АНЦ «Донской»
11	Отбор 135	varia	АНЦ «Донской»
12	Отбор 26	varia	АНЦ «Донской»
13	Team	sativa	США
14	Г 80/13	varia	АНЦ «Донской»
15	Г 3/13	varia	АНЦ «Донской»
16	Отбор 142	varia	АНЦ «Донской»
17	Г 57/13	varia	АНЦ «Донской»
18	Отбор 1	varia	АНЦ «Донской»
19	Г 118/13	varia	АНЦ «Донской»
20	Г 100/13	varia	АНЦ «Донской»
21	Отбор 37/95	varia	АНЦ «Донской»
22	Син 4576	varia	АНЦ «Донской»
23	Отбор 39	varia	АНЦ «Донской»
24	Син 36/95	varia	АНЦ «Донской»
25	Г 101/13	varia	АНЦ «Донской»
26	Г 116/13	varia	АНЦ «Донской»
27	А 12/1	varia	АНЦ «Донской»
28	Отбор 32/2 из Вавиловской	varia	АНЦ «Донской»
29	Отбор 34/1	varia	АНЦ «Донской»
30	Син 55/99	varia	АНЦ «Донской»
31	Отбор 48	varia	АНЦ «Донской»
32	Отбор 5	varia	АНЦ «Донской»
33	Г 98/13	varia	АНЦ «Донской»
34	Ladak 65	sativa	США

(Продолжение таблицы 1)

	Сорт (образец)	Разновидность	Страна (оригинатор)
35	Saga	sativa	Канада
36	Уралочка	varia	Россия
37	Г-2	varia	АНЦ «Донской»
38	Г-5	varia	АНЦ «Донской»
39	Г-7	varia	АНЦ «Донской»
40	Г-8	varia	АНЦ «Донской»
41	Вавиловская Юбилейная	varia	АНЦ «Донской»
42	Донская 2	varia	АНЦ «Донской»
43	Донская 5	varia	АНЦ «Донской»
44	Маньчжурская улучшенная	varia	АНЦ «Донской»
45	Син № 1	varia	АНЦ «Донской»
46	СГЛ 183	varia	АНЦ «Донской»
47	Планет	sativa	Канада
48	СГП 128	varia	АНЦ «Донской»
49	СГЛ 152	varia	АНЦ «Донской»
50	СГЛ 147	varia	АНЦ «Донской»
51	СГП 137	varia	АНЦ «Донской»
52	СГЛ 177	varia	АНЦ «Донской»
53	СГЛ 151	varia	АНЦ «Донской»
54	СГП 133	varia	АНЦ «Донской»
55	СГЛ 167	varia	АНЦ «Донской»
56	СГЛ 174	varia	АНЦ «Донской»
57	СГЛ 172	varia	АНЦ «Донской»
58	СГЛ 2012	varia	АНЦ «Донской»
59	Veko	varia	Канада
60	Скривери	varia	Латвия

Опыт закладывался по методике Всесоюзного института растениеводства¹, согласно которой через каждые 10 образцов высевали стандартный сорт Ростовская 90 (на сегодняшний день используется на сортоучастках Ростовской области).

Предшественник — черный пар. Предпосевная обработка — весенняя культивация с одновременным боронованием и последующим прикатыванием. Площадь деланки — 1 м², междурядье — 20 см, длина — 1,70 м, повторность — двукратная. Норма высева — 2 г/м². После посева — прикатывание.

В период вегетации применение пестицидов для борьбы с сорной растительностью и вредителями.

Для комплексного изучения был выбран ряд важных признаков, влияющих на продуктивность и качество корма: высота растений, облиственность, урожайность сена, содержание сухого вещества, протеина, золы, жира, клетчатки.

За день до учета зеленой массы высоту растений замеряли в 10 местах деланки от поверхности

почвы до конца соцветий. Скашивание зеленой массы выполняли в фазе «бутонизация — начало цветения», учет проводили в физической массе. В период учета зеленой массы отбирали сноп весом 1 кг для определения облиственности и качественных показателей².

Качественную оценку проводили по следующим показателям: абсолютно сухое вещество — ГОСТ-31640-2012³, количество сырого протеина — ГОСТ 10846-91⁴, содержание сырого жира — ГОСТ 13496.15-2016⁵, золы — ГОСТ 32933-2014⁶, клетчатки — ГОСТ 31675-2012⁷.

При изучении сортов питомника применяли следующие методики: по проведению полевых опытов с кормовыми культурами и методике полевого опыта⁸, широкий унифицированный классификатор рода Medicado L.⁹, методику государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур¹⁰, методические указания по изучению коллекций многолетних кормовых растений¹¹.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Excel (Microsoft, США).

Количество осадков во время закладки опыта в весенний период 2022 г. составляло 94% от среднесуточной нормы, тепловой режим был близок к среднесуточному. В летний период количество осадков составило только 70% от среднесуточного их количества на фоне высоких среднемесячных температур (в июне на 2,7 °С, июле на 1,0 °С, в августе на 4,8 °С выше среднесуточных за эти месяцы). Выпадали они неравномерно и носили ливневый характер. Недостаток осадков весеннего и летнего периодов и высокие среднесуточные температуры существенно отразились на высоте растений люцерны.

В начале весеннего периода 2023 г. количество осадков было близким к среднесуточным значениям, а в апреле и мае составляло 191% от среднесуточной нормы. Тепловой режим был выше среднесуточного. В летний период количество осадков составило только 62% от среднесуточного их количества. Выпадали они неравномерно и носили ливневый характер на фоне высоких среднемесячных температур (в июне на уровне среднесуточных, в июле на 0,9 °С, в августе на 4,1 °С выше).

В весенний и летний периоды 2024 г. выпало осадков, соответственно, 91,6 мм (69,9% от нормы) и 113,2 мм (65,0% от нормы), и на фоне

¹ Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. Под ред. Ю.К. Новоселова, В.Н. Киреева, Г.П. Кутузова и др. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт кормов им. В.Р. Вильямса. 1997; 156.

² Методические указания по селекции многолетних трав. М.А. Смурыгин, А.С. Новоселова, А.М. Константинова и др. М.: ВИК. 1985; 188.

³ ГОСТ 31640-2012 Корма. Методы определения содержания сухого вещества.

⁴ ГОСТ 10846-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка.

⁵ ГОСТ 13496.15-2016 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира.

⁶ ГОСТ 32933-2014 (ISO 5984:2002) Корма, комбикорма. Метод определения сырой золы.

⁷ ГОСТ 31675-2012 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации.

⁸ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс. 2014; 352.

⁹ Широкий унифицированный классификатор СЭВ рода Medicado L. / Сост. А. Иванов. Л.: ВИР. 1987; 30.

¹⁰ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / Подгот. М.А. Федина и др. Москва. 1989; 2: 194.

¹¹ Изучение коллекции многолетних кормовых растений. Методические указания / Сост. А.И. Иванов и др. Л.: ВИР. 1985; 48.

среднесуточных температур (в марте на 2,9 °С, в апреле на 5,9 °С, в июне на 4,2 °С, в июле на 4,8 °С и в августе на 3,6 °С выше среднемесячных) создались напряженные условия увлажнения на посевах текущего года¹².

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Урожайность зеленой массы — основной показатель для кормовой культуры. Урожайность зеленой массы изучаемых образцов люцерны варьировала от 1,18 кг/м² (Отбор 26) до 5,94 кг/м² (СГЛ 151) (рис. 1).

Урожайность зеленой массы стандарта Ростовская 90 в среднем за годы изучения составляла 4,22 кг/м². Варьирование этого показателя в изучаемом питомнике было в широких пределах — от 1,0 до 5,94 кг/м². Достоверно ($НСР_{05} = 1,17$ кг/м²) превышали стандарт следующие образцы: Отбор 39 (+1,23 кг/м²), Син 55/99 (+1,37 кг/м²), СГЛ 151 (+1,72 кг/м²). Остальные изучаемые образцы были на уровне стандарта (58% образцов) или существенно уступали ему (37% образцов).

Складывавшиеся в период изучения погодноклиматические условия не позволили образцам коллекционного питомника реализовать потенциал по высоте растений, показатели были в пределах низкорослой (50,0–69,9 см) и среднерослой (70,0–89,9 см) групп (рис. 2).

Высота стандартного сорта в среднем за три года составила 67 см. По широкому унифицированному классификатору род *Medicago* в среднерослой группе (70,0–89,9 см) находились образцы, которые достоверно ($НСР_{05} = 4,5$ см) превысили стандарт: Син 55/99 (+5 см), Донская 5 (+5 см), Скривери (+5 см), Отбор 39 (+8 см), СГЛ 152 (+8 см) с высотой растений в пределах 72–75 см. Доля образцов низкорослой группы составила 86,6%.

Так как основная часть питательных элементов корма содержится в листочках растений, облиственность является одним из ключевых показателей для кормовой культуры. Облиственность растений образцов люцерны варьировала от 35% (Татьяна) до 61% (Донская 2) (рис. 3).

В изучаемом коллекционном питомнике люцерны 91,7% образцов были с высокой облиственностью (40–50%). Достоверно ($НСР_{05} = 4,6$ %) большую, чем у стандарта, облиственность (48–61%) имели образцы Павловская 7, Уралочка, Воронежская 6, Г 80/13, Г 116/13, Скривери, Вавиловская Юбилейная, Планет, СГЛ 152, Донская 5, Манычская улучшенная, Донская 2, Ladak 65, превышение их над стандартом составляло 5–18% при облиственности стандарта Ростовская 90 43%.

Наряду с урожайностью зеленой массы урожайность сена является неотъемлемым критерием выбора сорта кормовой культуры для возделывания. По урожайности сена изучаемые

Рис. 1. Распределение образцов коллекции люцерны по урожайности зеленой массы, 2022–2024 гг.

Fig. 1. Distribution of alfalfa collection samples by green mass yield, 2022–2024

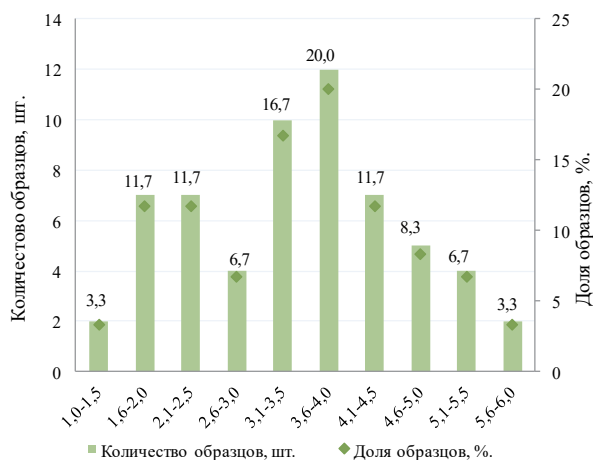


Рис. 2. Распределение образцов коллекции люцерны по высоте растения, 2022–2024 гг.

Fig. 2. Distribution of alfalfa collection samples by plant height, 2022–2024

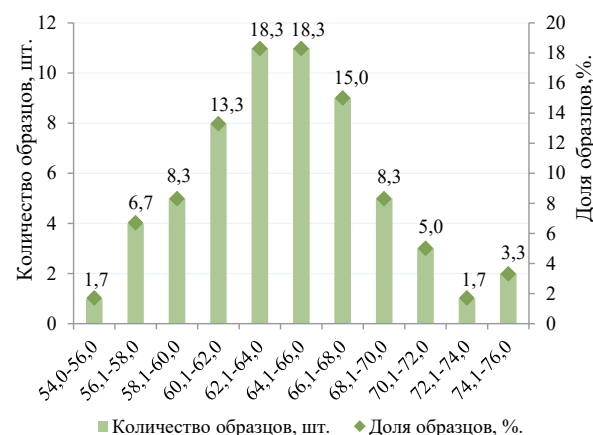


Рис. 3. Распределение образцов коллекции люцерны по признаку облиственности растений, 2022–2024 гг.

Fig. 3. Distribution of alfalfa collection samples by plant foliage, 2022–2024



¹² <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34735.htm>

образцы люцерны распределялись от 0,39 кг/м² (Отбор 26) до 1,84 кг/м² (СГЛ 151) (рис. 4).

Урожайность сена стандарта Ростовская 90 в среднем за годы изучения составляла 1,24 кг/м². Достоверно ($HCP_{05} = 0,35$ кг/м²) превысившими стандарт образцами были Г-5 (+0,37 кг/м²), Син 55/99 (+0,38 кг/м²), Татьяна (+0,39 кг/м²). Наибольшая урожайность сена была у образца СГЛ 151 (1,84 кг/м²), превысившего стандарт на 0,60 кг/м² (этот образец представляет интерес для селекционной работы).

Для люцерны, как кормовой культуры, немало важным является качество корма. Первостепенное значение для хорошего качества кормовой массы имеет высокое содержание сухого вещества и сырого протеина. В среднем за три года содержание сухого вещества в растениях люцерны в коллекционном питомнике варьировало от 25,59% (Veko) до 30,48% (Донская 2) (рис. 5).

Большинство образцов люцерны (69,9%) имели содержание сухого вещества от 27,14% (СГЛ 167) до 27,81% (Отбор 72 ЛСП 430), у стандартного сорта Ростовская 90 этот показатель составил 28,22%. Достоверно ($HCP_{05} = 0,99$ %) его превысили образцы: Saga, Ladak 65, Отбор 48 (29,37%); Син № 1, Донская 5, Г-7, Син 4576 (29,59%); Г-5, Отбор 34/1 (29,81%); Донская 2 (30,48%). Превышение над стандартным сортом составляло 1,15–2,26%.

Содержание сырого протеина в абсолютно сухом веществе варьировало от 14,00% (Отбор 34/1) до 20,98% (Воронежская 6) (рис. 6).

Распределение большей части образцов (83,3%) было от 15,10% (Кевсала) до 20,98% (СГП 137). Стандарт находился в группе с низким содержанием протеина (16,40%). Достоверно ($HCP_{05} = 1,52$ %) превысили стандарт образцы с высоким содержанием протеина Воронежская 6 (20,98%), Павловская 7 (20,34%), Елена (19,60%), СГЛ 151 (19,51%), Павловская 7 (19,46%), Veko (19,26%), Скривери (19,26%), СГП 137 (18,98%), СГЛ 147 (18,79%), Отбор 32/2 из Вавиловской (18,74%), Манычская улучшенная (18,60%), Отбор 39 (18,57%), Г 57/13 (18,49%), Г 80/13 (18,25%). Превышение составляло 2,09–3,94%.

В результате изучения коллекционного питомника люцерны в среднем за 2022–2024 гг. были выделены источники высокой продуктивности зеленой массы — Отбор 39, Син 55/99, СГЛ 151, которые представляют интерес для селекции на кормовую продуктивность в качестве исходного материала (табл. 2).

В таблице 3 представлен анализ корреляционных зависимостей между признаками образцов коллекционного питомника люцерны, который показал наличие значимых на $p = 0,05$ уровне средних отрицательных связей между признаками «облиственность» — «урожайность зеленой массы» ($r = -0,34 \pm 0,12$), «урожайность сена» — «облиственность» ($r = -0,33 \pm 0,12$), «сырой протеин» — «сухое вещество» ($r = -0,41 \pm 0,10$), слабой

Рис. 4. Распределение образцов коллекции люцерны по урожайности сена, 2022–2024 гг.

Fig. 4. Distribution of alfalfa collection samples by hay yield, 2022–2024

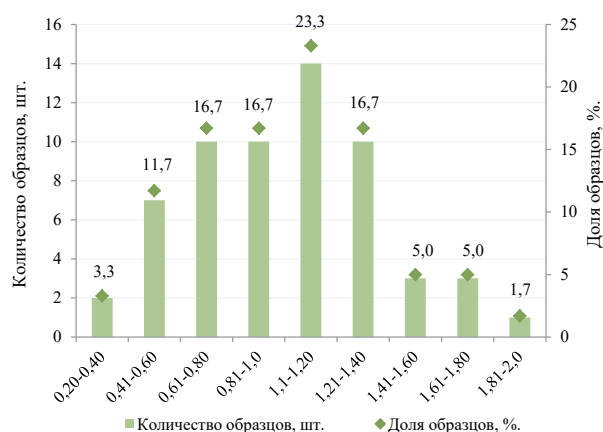


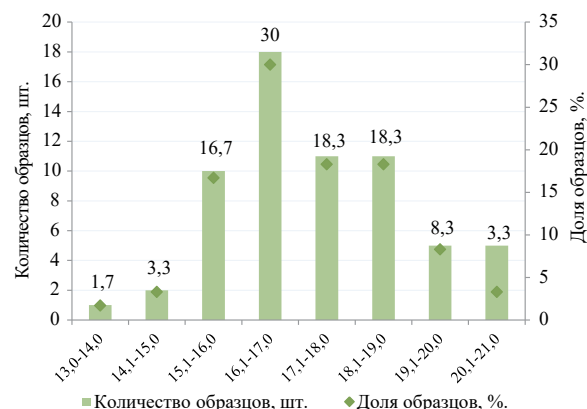
Рис. 5. Распределение образцов коллекции люцерны по содержанию сухого вещества, 2022–2024 гг.

Fig. 5. Distribution of alfalfa collection samples by dry matter content, 2022–2024



Рис. 6. Распределение образцов коллекции люцерны по содержанию сырого протеина, 2022–2024 гг.

Fig. 6. Distribution of alfalfa collection samples by crude protein content, 2022–2024



положительной связи между признаками «сухое вещество» — «урожайность сена» ($r = 0,27 \pm 0,12$), а также сильной положительной связи между признаками «урожайность сена» — «урожайность зеленой массы» ($r = 0,96 \pm 0,04$).

По результатам оценки качественного состава зеленой массы коллекции люцерны были выявлены образцы с высоким содержанием питательных веществ в растениях (табл. 4).

При уборке зеленой массы в фазу «бутонизация — начало цветения» среднее содержание абсолютно сухого вещества находилось в диапазоне 25,59–30,48%, сырого протеина в АСВ — 14,00–20,98%, золы — 8,08–12,90%, жира — 1,82–3,83%, клетчатки — 27,35–38,37%.

Достоверно превысили стандарт ($HCP_{05} = 0,99$) по содержанию абсолютно сухого вещества образцы Отбор 48 (+1,15%), Г-5 (+1,59%), Г-7 (+1,37%), Донская 2 (+2,26%), Донская 5 и Син № 1 (+1,37%). По содержанию сырого протеина в АСВ достоверным превышением над стандартом ($HCP_{05} = 1,52$) выделились образцы Павловская 7 (+3,94%), Павловская (+3,06%), Воронежская 6 (+4,58%), Елена (+3,20%), СГЛ 151 (+3,11%). Содержание золы в достоверно большей доле ($HCP_{05} = 0,98\%$) было у образцов Павловская (+2,37%), Воронежская 6 (+3,41%), Елена (+2,13%), Г-7 (+1,15%), Донская 5 (+1,37%), СГЛ 151 (+1,32%), жира ($HCP_{05} = 0,44\%$) — у образцов Донская 2 (+0,51%), Син № 1 (+0,89%).

Для селекции на качество корма представляют интерес образцы люцерны с содержанием клетчатки в АСВ не более 30%. По результатам исследований такими образцами были Павловская 7 (27,35%) и Елена (27,59%).

Выводы/Conclusions

По результатам комплексного изучения образцов люцерны коллекционного питомника были выделены образцы с рядом полезных для последующей селекции признаков и свойств.

Источниками кормовой продуктивности в перспективе могут стать образцы Отбор 39, Син 55/99 и СГЛ 151, достоверно превосходившие стандарт на 1,23–1,72 кг/м². Для селекции на качество корма интересны образцы Павловская 7, Павловская, Воронежская 6, Елена и СГЛ 151 с высоким содержанием сырого протеина в абсолютно сухом веществе — в среднем за три года превышение над стандартом составило 2,09–3,94%.

Таблица 2. Выделившиеся образцы люцерны по урожайности зеленой массы, 2022–2024 гг.

Table 2. Outstanding alfalfa samples by green mass yield, 2022–2024

Образец	Высота растений, см	Урожайность зеленой массы		Облиственность, %	Урожайность сена	
		кг/м ²	% к ст.		кг/м ²	% к ст.
Ростовская 90, ст.	67	4,22	100	43	1,24	100
Отбор 39	75	5,45	129	45	1,42	114
Син 55/99	72	5,59	132	47	1,62	130
СГЛ 151	60	5,94	141	43	1,84	148
HCP_{05}	4,5	1,16	–	4,58	0,35	–

Таблица 3. Корреляционные связи между признаками у образцов коллекционного питомника люцерны, 2022–2024 гг.

Table 3. Correlation relationships between traits in alfalfa collection nursery samples, 2022–2024

Признаки	1	2	3	4	5	6
Высота растений, см	1	1,00	–	–	–	–
Урожайность зеленой массы, кг/м ²	2	0,02	1,00	–	–	–
Облиственность, %	3	0,20	-0,34	1,00	–	–
Урожайность сена, кг/м ²	4	0,03	0,96	-0,33	1,00	–
Сухое вещество, %	5	0,15	0,18	0,05	0,27	1,00
Сырой протеин, %	6	0,04	-0,04	0,11	-0,05	-0,41

Таблица 4. Оценка качественных показателей зеленой массы коллекционных образцов люцерны, 2022–2024 гг.

Table 4. Evaluation of the quality of green mass of alfalfa collection samples, 2022–2024

Образец	Содержание АСВ* в зеленой массе, %	Содержание в АСВ, %			
		сырой протеин	зола	жир	клетчатка
Ростовская 90, ст.	28,22	16,40	9,49	2,95	34,21
Павловская 7	28,70	20,34	10,29	3,14	27,35
Павловская	27,14	19,46	11,86	2,79	28,50
Воронежская 6	28,26	20,98	12,90	2,95	29,47
Елена	26,92	19,60	11,62	2,69	27,59
Отбор 48	29,37	16,54	11,11	2,38	38,20
Г-5	29,81	15,65	10,19	2,14	38,37
Г-7	29,59	16,84	10,64	2,87	37,80
Донская 2	30,48	15,54	8,71	3,46	35,17
Донская 5	29,59	16,81	10,86	2,45	34,66
СГЛ 151	27,37	19,51	10,81	2,53	32,25
Син № 1	29,59	16,10	9,08	3,83	33,23
HCP_{05}	0,99	1,52	0,98	0,44	3,00

Примечание: * АСВ — абсолютно сухое вещество.

Образец СГЛ 151, превосходивший стандартный сорт по комплексу показателей (урожайность зеленой массы +1,72 кг/м², сено +0,60 кг/м², содержание сырого протеина в АСВ +3,11%, золы +1,32% по отношению к стандарту), будет использован в качестве исходного материала для создания новых высокоурожайных сортов с хорошим качеством корма.

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.

ФИНИНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»» по теме № 0505-2022-0003.

FUNDING

The research was carried out with the support of the Russian Ministry of Education and Science as part of the State Assignment of the FBSI «Agricultural Research Center «Donskoy»» No. 0505-2022-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. El-Ramady H. et al. Sustainable Biorefinery of Alfalfa (*Medicago sativa* L.): A Review. *Egyptian Journal of Botany*. 2020; 60(3): 621–639. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2020.37749.1532>
2. Бельченко Д.С., Дронов А.В., Бельченко С.А., Пономарчук О.В. Значение бобово-злаковых трав на основе люцерны в формировании агроценозов на серых лесных почвах. *Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК. Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного работника сельского хозяйства РСФСР, заведующего Кокинским опорным пунктом НИИЗИСНП, доцента кафедры плодовоощеводства Брянского СХИ А.А. Высоцкого и 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, заведующего кафедрой общего земледелия и растениеводства Брянской ГСХА д-ра с.-х. наук, профессора В.Ф. Мальцева*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2025; 145–155. <https://elibrary.ru/dopnap>
3. Бельченко Д.С., Дронов А.В., Бельченко С.А. Потенциал кормовой продуктивности сортов люцерны изменчивой (*Medicago varia* Mart.) и посевной (*M. Sativa* L.) на Брянщине. *Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК. Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного работника сельского хозяйства РСФСР, заведующего Кокинским опорным пунктом НИИЗИСНП, доцента кафедры плодовоощеводства Брянского СХИ А.А. Высоцкого и 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, заведующего кафедрой общего земледелия и растениеводства Брянской ГСХА д-ра с.-х. наук, профессора В.Ф. Мальцева*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2025; 117–122. <https://elibrary.ru/qyzzoy>
4. Регидин А.А., Игнатъев С.А., Горюнов К.Н., Кравченко Н.С. Оценка хозяйственно-биологических признаков исходного материала люцерны на юге Ростовской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022; 23(4): 471–479. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4.471-479>
5. Улаачын А.К., Яковченко М.А. Совершенствование приемов возделывания люцерны на корм в условиях Республики Тыва. *Каталог выпускных квалификационных работ Кузбасского государственного аграрного университета — 2024*. Кемерово: Кузбасский ГАУ. 2024; 99–104. <https://elibrary.ru/htkuiv>
6. Шелюк Е.Е. Заготовка сочных кормов: силос из люцерны. *Передовые достижения науки в молочной отрасли. Сборник научных трудов по результатам работы VI Международной научно-практической конференции, посвященной дню рождения Н.В. Верещagina*. Вологда-Молоchnoe: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещagina». 2024; 414–417. <https://elibrary.ru/qxatdc>
7. Аршаулов Ю.А. Сорта люцерны изменчивой и их характеристика. *Научные труды студентов Ижевской ГСХА: сборник статей*. Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет. 2024; 5–9. <https://elibrary.ru/lsqkrj>
8. Ломов М.В. Краткая характеристика новых селекционных образцов люцерны в условиях Подмосквья. *Адаптивное кормопроизводство*. 2024; (3): 6–14. <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2024-3-6-14>
9. Князева Т.В., Грекова И.В., Швыдкая Н.В. Биологизированные приемы оптимизации технологии выращивания люцерны. *Почвенное плодородие — основа устойчивого развития сельскохозяйственного производства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Б.И. Тарасенко и 120-летию со дня рождения профессора А.П. Джулая*. Краснодар: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина». 2024; 87–89. <https://elibrary.ru/jrenrl>
10. Шадрин Л.А., Дмитренко А.И. Влияние технологий возделывания люцерны на антифитопатогенный потенциал почвы. *Современные векторы развития науки. Сборник статей по материалам Ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год*. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 105–106. <https://elibrary.ru/ntruit>
11. Kumar T., Bao A.-K., Bao Z., Wang F., Gao L., Wang S.-M. The progress of genetic improvement in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2018; 54(2): 41–51. <https://doi.org/10.17221/46/2017-CJGPB>

REFERENCES

1. El-Ramady H. et al. Sustainable Biorefinery of Alfalfa (*Medicago sativa* L.): A Review. *Egyptian Journal of Botany*. 2020; 60(3): 621–639. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2020.37749.1532>
2. Belchenko D.S., Dronov A.V., Belchenko S.A., Ponomarchuk O.V. The Importance of Legume-Cereal Grasses Based on Alfalfa in the Formation of Agroecosystems on Gray Forest Soils. *Agroecological Aspects of Sustainable Development of the AIC. Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Honored Worker of Agriculture of the RSFSR, head of the Kokinsky stronghold of the NIZISNP, Associate Professor of the Department of Horticulture of the Bryansk Agricultural Institute A.A. Vysotsky and 85th anniversary of the birth of the Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of General Agriculture and Crop Production of the Bryansk Agricultural Academy, Dr. of Agricultural Sciences, Professor V.F. Maltsev*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 145–155 (in Russian). <https://elibrary.ru/dopnap>
3. Belchenko D.S., Dronov A.V., Belchenko S.A. Potential for forage productivity of alfalfa varieties (*Medicago varia* Mart.) and sowing (*M. Sativa* L.) in the Bryansk region. *Agroecological aspects of sustainable development of the agro-industrial complex. Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Honored Worker of Agriculture of the RSFSR, head of the Kokinsky stronghold of the NIZISNP, Associate Professor of the Department of Horticulture of the Bryansk Agricultural Institute A.A. Vysotsky and 85th anniversary of the birth of the Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of General Agriculture and Crop Production of the Bryansk Agricultural Academy, Dr. of Agricultural Sciences, Professor V.F. Maltsev*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 117–122 (in Russian). <https://elibrary.ru/qyzzoy>
4. Regidin A.A., Ignatiev S.A., Goryunov K.N., Kravchenko N.S. Estimation of economic and biological traits of the alfalfa initial material in the south of the Rostov region. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022; 23(4): 471–479 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.4.471-479>
5. Ulaachyn A.K., Yakovchenko M.A. Improving the methods of cultivating alfalfa for forage in the conditions of the Republic of Tyva. *Catalog of graduate qualification works of Kuzbass State Agrarian University — 2024*. Kemerovo: Kuzbass SAU. 2024; 99–104 (in Russian). <https://elibrary.ru/htkuiv>
6. Shelyuk E.E. Harvesting succulent fodder: alfalfa silage. *Advanced scientific achievements in the dairy industry. Collection of scientific papers based on the results of the VI International scientific and practical conference dedicated to the birthday of N.V. Vereshchagin*. Vologda-Molochnoe: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin". 2024; 414–417 (in Russian). <https://elibrary.ru/qxatdc>
7. Arshaulov Yu.A. Varieties of variable alfalfa and their characteristics. *Scientific works of students of the Izhevsk State Agricultural Academy: a collection of articles*. Izhevsk: Udmurt State Agrarian University. 2024; 5–9 (in Russian). <https://elibrary.ru/lsqkrj>
8. Lomov M.V. Brief description of new breeding samples alfalfa in the Moscow region. *Adaptive Fodder Production*. 2024; (3): 6–14 (in Russian). <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2024-3-6-14>
9. Knyazeva T.V., Grekova I.V., Shvydkaya N.V. Biologized methods for optimizing alfalfa cultivation technology. *Soil fertility is the basis for sustainable development of agricultural production. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor B.I. Tarasenko and the 120th anniversary of the birth of Professor A.P. Dzhalai*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 87–89 (in Russian). <https://elibrary.ru/jrenrl>
10. Shadrina L.A., Dmitrenko A.I. The influence of alfalfa cultivation technologies on the antiphytopathogenic potential of the soil. *Modern vectors of scientific development. Collection of articles based on the materials of the Annual scientific and practical conference of teachers on the results of research for 2023*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 105–106 (in Russian). <https://elibrary.ru/ntruit>
11. Kumar T., Bao A.-K., Bao Z., Wang F., Gao L., Wang S.-M. The progress of genetic improvement in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2018; 54(2): 41–51. <https://doi.org/10.17221/46/2017-CJGPB>

12. Ашиев А.Р., Хабибуллин К.Н., Скулова М.В., Кравченко Н.С. Оценка исходного материала сои по качеству зерна на гомеостатичность. *Зерновое хозяйство России*. 2019; (5): 45–49. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-65-5-45-49>
13. Володина И.А., Абраменко И.С. Оценка перспективных популяций люцерны изменчивой (*Medicago varia*). *Вестник КрасГАУ*. 2020; (7): 56–62. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-7-56-62>
14. Иванова Е.П. Урожайность и качество различных сортов люцерны в условиях Сахалина. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2022; (12): 66–72. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-218-12-66-72>
15. Косолапова В.Г., Муссие С.А. Питательная ценность люцерны различных сортов в процессе роста и развития. *Кормопроизводство*. 2020; (10): 17–24. <https://www.elibrary.ru/ricqxs>
16. Низаева А.А., Кузнецов И.Ю., Азнаева Г.М., Асылбаев И.Г., Акчурин Р.Л. Продуктивность сортов люцерны и питательная ценность получаемого корма в условиях Республики Башкортостан. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2025; 1(73): 27–33. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2025-73-1-27-33>
17. Сапрыкин С.В., Сапрыкина Н.В., Любцева О.Н., Цейко Л.М. Новый сорт люцерны желтой — Донская. *Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов. Сборник докладов V Международной научно-практической конференции*. Курск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Курский федеральный аграрный научный центр». 2023; 56–61. <https://elibrary.ru/vavdpo>
18. Jing F. *et al.* The Physiological Basis of Alfalfa Plant Height Establishment. *Plants*. 2024; 13(5): 679. <https://doi.org/10.3390/plants13050679>
19. Ercan U., Kabas O., Moiceanu G. Prediction of Leaf Break Resistance of Green and Dry Alfalfa Leaves by Machine Learning Methods. *Applied Sciences*. 2024; 14(4): 1638. <https://doi.org/10.3390/app14041638>
20. Hadidi M., Palacios J.C.O., McClements D.J., Mahfouzi M., Moreno A. Alfalfa as a sustainable source of plant-based food proteins. *Trends in Food Science & Technology*. 2023; 135: 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.023>
21. Li Y., Xie J., Liu H., Han L. A Method of Coupling Lucerne Quality with Meteorological Data to Evaluate the Suitability of Hay Harvest. *Agronomy*. 2024; 14(4): 761. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040761>
22. Филиппов Е.Г., Донцова А.А., Донцов Д.П., Дорошенко Э.С., Засыпкина И.М., Брагин Р.Н. Оценка исходного материала ярового ячменя в условиях Ростовской области. *Зерновое хозяйство России*. 2022; (1): 3–10. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-79-1-3-10>
23. Уалиева Г.Т., Сагалбеков У.М., Тагаев К.Ж., Байдалин М.Е. Основные этапы экспериментального создания и оценки исходного материала люцерны по модели сорта. *Наука и образование*. 2022; (3–3): 184–193. <https://www.elibrary.ru/sxnxjc>
24. Савинич Е.А. Изменчивость плодов и семенного потомства абрикоса сорта Академик и сортообразца Поздний Филиппева на юге Средней Сибири. *Аграрная наука*. 2025; (2): 145–149. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-145-149>
25. Садиков А.Т. Изучение показателей продуктивности и урожайности сортов и линий хлопчатника при выращивании в условиях Центрального Таджикистана. *Аграрная наука*. 2025; (1): 100–105. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-100-105>
26. Подгорный С.В., Скрипка О.В., Самофалов А.П., Чернова В.Л., Чернова А.А. Хозяйственно-биологическая оценка нового среднеспелого сорта мягкой озимой пшеницы Приазовье. *Аграрная наука*. 2024; (9): 95–100. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-95-100>
27. 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>
28. Богдан П.М., Красковская Н.А., Даниленко И.Н. Оценка коллекции инбредных линий кукурузы приморской селекции. *Аграрная наука*. 2023; (9): 133–138. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-133-138>
29. Тулинов А.Г. Изучение перспективных гибридов картофеля питомников предварительного и основного испытаний в условиях Республики Коми. *Аграрная наука*. 2025; (6): 126–132. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-126-132>
12. Ashiev A.R., Khabibullin K.N., Skulova M.V., Kravchenko N.S. The estimation of soybean initial material according to grain quality on homeostasis. *Grain Economy of Russia*. 2019; (5): 45–49 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-65-5-45-49>
13. Volodina I.A., Abramenko I.S. The assessment of prospective populations of variable alfalfa (*Medicago varia* Mar.). *Bulletin of KrasGAU*. 2020; (7): 56–62 (in Russian). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-7-56-62>
14. Ivanova E.P. Yield and quality of alfalfa varieties under the conditions of the Sakhalin island. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2022; (12): 66–72 (in Russian). <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-218-12-66-72>
15. Kosolapova V.G., Mussie S.A. Nutritional value of alfalfa genotypes at various growth stages. *Forage production*. 2020; (10): 17–24 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ricqxs>
16. Nizaeva A.A., Kuznetsov I.Yu., Aznaeva G.M., Asylbaev I.G., Akchurin R.L. Productivity of alfalfa varieties and nutritional value of the resulting feed in the conditions of the Republic of Bashkortostan. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2025; 1(73): 27–33 (in Russian). <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2025-73-1-27-33>
17. Saprykin S.V., Saprykina N.V., Lyubtseva O.N., Tseiko L.M. New variety of yellow alfalfa — Donskaya. *Problems and prospects of scientific and innovative support of the agro-industrial complex of the regions. Collection of reports of the V International scientific and practical conference*. Kursk: Federal State Budgetary Scientific Institution “Kursk Federal Agrarian Scientific Center”. 2023; 56–61 (in Russian). <https://elibrary.ru/vavdpo>
18. Jing F. *et al.* The Physiological Basis of Alfalfa Plant Height Establishment. *Plants*. 2024; 13(5): 679. <https://doi.org/10.3390/plants13050679>
19. Ercan U., Kabas O., Moiceanu G. Prediction of Leaf Break Resistance of Green and Dry Alfalfa Leaves by Machine Learning Methods. *Applied Sciences*. 2024; 14(4): 1638. <https://doi.org/10.3390/app14041638>
20. Hadidi M., Palacios J.C.O., McClements D.J., Mahfouzi M., Moreno A. Alfalfa as a sustainable source of plant-based food proteins. *Trends in Food Science & Technology*. 2023; 135: 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.023>
21. Li Y., Xie J., Liu H., Han L. A Method of Coupling Lucerne Quality with Meteorological Data to Evaluate the Suitability of Hay Harvest. *Agronomy*. 2024; 14(4): 761. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040761>
22. Filippov E.G., Dontsova A.A., Dontsov D.P., Doroshenko E.S., Zasyapkina I.M., Bragin R.N. Estimation of the initial material of spring barley in the Rostov region. *Grain Economy of Russia*. 2022; (1): 3–10 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-79-1-3-10>
23. Ualiyeva G.T., Sagalbekov U.M., Tagaev K.Zh., Baidalin M.E. The main stages of experimental creation and evaluation of the initial material of lucern on a variety model. *Gylm zhane bilim*. 2022; (3–3): 184–193 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/sxnxjc>
24. Savinich E.A. ariability of fruits and seed progeny cultivars apricot Akademik and Pozdnyy Filipyev in the south of Central Siberia. *Agrarian science*. 2025; (2): 145–149 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-145-149>
25. Sadikov A.T. Study of productivity and yield indicators of cotton varieties and lines when grown in the conditions of Central Tajikistan. *Agrarian science*. 2025; (1): 100–105 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-100-105>
26. Podgorny S.V., Skripka O.V., Samofalov A.P., Chernova V.L., Chernova A.A. Economic and biological assessment of a new medium-ripened variety of soft winter wheat Priazovye. *Agrarian science*. 2024; (9): 95–100 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-95-100>
27. 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>
28. Bogdan P.M., Kraskovskaya N.A., Danilenko I.N. Evaluating the collection of maize inbred lines originating from Primorsky Krai. *Agrarian science*. 2023; (9): 133–138 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-133-138>
29. Tulinov A.G. Study of promising potato hybrids from nurseries of preliminary and main trials in the conditions of the Komi Republic. *Agrarian science*. 2025; (6): 126–132 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-395-06-126-132>

30. Афанасьева Ю.В. Оценка устойчивости коллекционных образцов озимой пшеницы к стрессовым факторам зимнего периода. *Аграрная наука*. 2024; (11): 122–128.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-122-128>

ОБ АВТОРАХ

Кирилл Николаевич Горюнов

кандидат сельскохозяйственных наук,
 младший научный сотрудник
goriunovkirill@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5685-6508>

Андрей Алексеевич Регидин

научный сотрудник
mногоletnie.travy@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3246-1501>

Нина Станиславовна Кравченко

кандидат биологических наук, ведущий научный
 сотрудник лаборатории биохимической, технологической
 и агрохимической оценки
<https://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

Аграрный научный центр «Донской»,
 Научный городок — 3, Зерноград, Ростовская обл.,
 347740, Россия

30. Afanasyeva Yu.V. Evaluation of resistance of collection samples of winter wheat to stress factors of the winter period. *Agrarian science*. 2024; (11): 122–128 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-122-128>

ABOUT THE AUTHORS

Kirill Nikolaevich Goryunov

Candidate of Agricultural Sciences,
 Junior Researcher
goriunovkirill@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5685-6508>

Andrey Alekseevich Regidin

Researcher Associate
mногоletnie.travy@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3246-1501>

Nina Stanislavovna Kravchenko

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the
 Laboratory for Biochemical, Technological
 and Agrochemical Estimation
<https://orcid.org/0000-0003-3388-1548>

Agricultural Research Center “Donskoy”,
 3 Nauchny Gorodok, Zernograd, Rostov region, 347740,
 Russia



Подпишитесь на Telegram канал
 ID «Аграрная наука»



Еженедельно вы будете получать
 свежие новости АПК
 и сельского хозяйства,
 анонсы отраслевых событий,
 знакомиться 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

Р.С. Крохалев

И.Я. Гричанов ✉

Всероссийский научно-
исследовательский институт защиты
растений, Санкт-Петербург, Россия

✉ grichanov@mail.ru

Поступила в редакцию: 07.08.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Крохалев Р.С., Гричанов И.Я.

mini-review

 creative commons
Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-122-130

Roman S. Krokhalev

Igor Ya. Grichanov ✉

All-Russian Institute of Plant
Protection, Saint-Petersburg, Russia

✉ grichanov@mail.ru

Received by the editorial office: 07.08.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Krokhalev R.S., Grichanov I.Ya.

Современные тенденции в исследованиях и технологиях применения аттрактантов для мониторинга вредных чешуекрылых

РЕЗЮМЕ

В работе представлен обзор современных тенденций в исследованиях и технологиях применения синтетических половых аттрактантов (СПА) для мониторинга фитофагов на примере вредных чешуекрылых плодового сада. На основе анализа научных публикаций отечественных и зарубежных исследователей показаны высокая значимость и совершенствование применения феромонов для целей фитосанитарного мониторинга. Отмечены следующие направления исследований: новые материалы и диспенсеры СПА; выявление факторов, влияющих на отлов феромонными ловушками самцов целевых видов; создание комбинаций феромонов с другими типами аттрактантов; совместное применение СПА с другими методами мониторинга; внедрение автоматизированных систем мониторинга и подсчета отловленных насекомых в ловушках. Особое внимание в обзоре уделено отечественным разработкам и исследованиям в области создания и применения носителей СПА. Дальнейшее развитие применения аттрактантов заключается во внедрении автоматизированного феромонного мониторинга с использованием систем искусственного интеллекта и безловушечных методов проведения мониторинга вредных чешуекрылых.

Ключевые слова: синтетические половые аттрактанты, мониторинг, феромоны, феромонные ловушки, вредные чешуекрылые, диспенсеры, методы

Для цитирования: Крохалев Р.С., Гричанов И.Я. Современные тенденции в исследованиях и технологиях применения аттрактантов для мониторинга вредных чешуекрылых. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 122–130.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-122-130>

Current trends in attractant research and their application technologies for monitoring harmful lepidopterans

ABSTRACT

The paper presents an overview of current trends in research and technologies for the use of synthetic sex attractants (SSA) for monitoring phytophages using lepidopteran pests in an orchard as an example. Based on the analysis of scientific publications by domestic and foreign researchers, the high significance and improvement of the use of pheromones for phytosanitary monitoring and is shown. The following research areas are noted: new materials and dispensers for SSA; identification of factors influencing the capture of males of target species by pheromone traps; creation of combinations of pheromones with other types of attractants; joint use of SSA with other monitoring methods; implementation of automated systems for monitoring and counting insects captured in traps. Particular attention in the review is paid to domestic developments and research in the field of creation and use of SSA carriers. Further development of the use of attractants consists in the introduction of automated pheromone monitoring using artificial intelligence systems and trap-free methods for monitoring harmful lepidoptera.

Key words: synthetic sex attractants, monitoring, pheromones, pheromone traps, lepidopteran pests, dispensers, methods

For citation: Krokhalev R.S., Grichanov I.Ya. Current trends in attractant research and their application technologies for monitoring harmful lepidopterans. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 122–130 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-122-130>

Введение/Introduction

Фитосанитарный мониторинг чешуекрылых является важным элементом интегрированной защиты растений от комплекса вредителей. Появление СПА расширило функции и возможности фитосанитарного мониторинга и благодаря им его рассматривают как целостную систему наблюдений за составом популяций вредных чешуекрылых [1].

В практике фитосанитарного мониторинга СПА используются в основном для: обнаружения очагов вредных видов и выявления их ареалов; надзора за популяциями вредителей, включая определение уровня плотности и сигнализации сроков проведения истребительных мероприятий; определения уровня численности вредителя и порога вредоносности и на этой основе установления целесообразности проведения защитных мероприятий [2].

Исследователи применяют СПА для: оценки и мониторинга уровня загрязнения окружающей среды производственными и сельскохозяйственными поллютантами; обнаружения очагов массового размножения вредных чешуекрылых и мониторинга границ ареалов наиболее опасных фитофагов; анализа аномальных явлений динамики численности вредных чешуекрылых (депрессии, миграции); определения роли экологических факторов в динамике численности ночных чешуекрылых с преобладанием феромонного типа коммуникации [1].

Следует заметить, что ловушки, феромонные материалы и технологии их применения могут сильно отличаться в зависимости от семейства, к которому принадлежат целевые вредные чешуекрылые, и требуют специальных исследований.

Цель данной работы — анализ научных публикаций по тенденциям в исследованиях и применении аттрактантов фитофагов для мониторинга на примере вредных чешуекрылых плодового сада.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Обзор тенденций в исследованиях и технологиях применения аттрактантов для мониторинга вредных чешуекрылых выполнен на основе изучения научных трудов ведущих отечественных и зарубежных ученых последних лет.

Были проанализированы 55 научных источников, посвященных мониторингу в основном чешуекрылых насекомых — вредителей плодового сада. Использовали научные публикации в рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) рецензируемых изданиях, индексируемых в библиографических базах Russian Science Citation Index (RSCI) для русскоязычных материалов и Scopus и Web of Science (WoS) для зарубежных изданий, а также в продолжающихся неперiodических изданиях, опубликованных в Российской Федерации и других странах преимущественно за последнее 5–10 лет.

Поиск трудов проводили в библиографических базах на сайтах Научной электронной библиотеки eLIBRARY (<https://elibrary.ru>), Google Академии (<https://scholar.google.com>) и в реестре цифровых идентификаторов объектов (DOI) Crossref (<https://crossref.org>) с использованием ключевых слов, соответствующих теме обзора. В первую очередь рассматривали научные труды с оригинальными экспериментальными данными, затем отбирали наиболее цитируемые и актуальные работы, после чего проводили анализ каждой из них. В ходе анализа в ряде случаев выявлены и описаны альтернативные точки зрения авторов.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В последние годы использование феромонных материалов позволяло оперативно оценивать динамику численности вредителей, сокращать объем химических обработок и предотвращать новые вспышки численности (например, в Московской области и Краснодарском крае) [3, 4].

Феромонные ловушки способствовали точному определению начала лёта и уровню численности яблонной плодовой моли *Cydia pomonella* L., что значительно снижало количество обработок или вообще приводило к отказу от них при низкой численности фитофага [5].

Долгосрочное применение феромонов в условиях влажных субтропиков России позволяло не только снизить поврежденность плодов косточковых культур плодовой моли (Lepidoptera: Tortricidae) в 3–6 раз, но и уменьшить себестоимость продукции в 2,2 раза по сравнению с контролем [6]. Подобные исследования в Бразилии показали, что использование ловушек с СПА цитрусовой огневки *Gymnandrosoma aurantianum* Lima 1927 позволили производителям в течение 12 лет предотвратить совокупные потери цитрусовых культур в размере от 132,7 млн долл. до 1,32 млрд долл. валового дохода [7].

Феромонные ловушки использовали в качестве надежного и эффективного средства для мониторинга таких карантинных видов, как яблонная плодовая моль в Китае и маньчжурская плодовая моль (*Grapholita inopinata* Hein) в России [8–10].

Применение СПА позволяло проводить оценку продуктивности плодовых культур, качества плодов и восприимчивости сортов и гибридов к фитофагам [11]. Феромонный мониторинг доказывает наличие сложных взаимосвязей между погодными условиями и поведением вредных чешуекрылых (в частности, среднесуточной температуры воздуха и количеством выпавших осадков) [12]. Необычным для практики является использование СПА для мониторинга платяной моли (*Tineola bisselliella* Hum.) и шубной моли (*Tinea pellionella* L.) молей в музейных фондах [13].

В 2000-х годах считалось, что с распадом Советского Союза научная работа по изучению и синтезу новых СПА практически прекратилась и

Рис. 1. Феромонная ловушка с СПА яблонной плодовой жуки производства АО «Щёлково-Агрохим», выставленная в яблоневом саду Пушкинского района г. Санкт-Петербурга (ориг.). Резиновый диспенсер подвешен на корпусе внутри ловушки. Фото авторов

Fig. 1. A pheromone trap with a SPA of apple moth produced by JSC "Shchelkovo-Agrochim", displayed in the apple orchard of the Pushkinsky district of St. Petersburg (original). The rubber dispenser is suspended from the body inside the trap. Photos of the authors



Рис. 2. Феромонная ловушка с СПА американской белой бабочки (*Hyphantria cunea* Drury) производства ВНИИР, выставленная в яблоневом саду Пушкинского района г. Санкт-Петербурга (ориг.). Диспенсер расположен на дне ловушки. Фото авторов

Fig. 2. Pheromone trap with the image of an American white butterfly (*Hyphantria cunea* Drury) produced by VNIIR, displayed in the apple orchard of the Pushkin district of St. Petersburg (original). The dispenser is located at the bottom of the trap. Photos of the authors



велась немногочисленными энтузиастами в научно-исследовательских институтах. Вследствие этого в эти годы организациям приходилось завозить феромоны зарубежного производства без гарантий качества и с высокой стоимостью (до 2000–2500 руб. за ловушку) [14].

В последнее время российские фирмы, главным образом АО «Щёлково-Агрохим» и Всероссийский центр карантина растений (ВНИИР), производили и передавали на испытания СПА собственного производства другим организациям (рис. 1, 2).

Наиболее активно испытания проводили в Российском государственном аграрном университете — Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева [15–17], Федеральном научном центре биологической защиты

растений [18–20], ВНИИР [21, 22], Всероссийском научно-исследовательском институте защиты растений (ВИЗР) [23–25].

Сравнительная характеристика феромонных ловушек российских фирм-производителей приведена в таблице 1.

В последние годы проводили исследования нестандартных типов ловушек (отличных от классических, состоящих из корпуса, клеевого вкладыша и диспенсера с СПА), например светоферомонных [26], а также факторов, влияющих на отлов феромонными ловушками самцов целевых видов, чему есть ряд примеров. Так, ловушки цилиндрической формы отлавливали на 60–65% особей яблонной плодовой жуки больше по сравнению с общепринятой дельтовидной [27].

Таблица 1. Характеристика феромонных ловушек российских фирм-производителей, тестируемых в ВИЗР (ориг.)

Table 1. Features of pheromone traps from Russian manufacturers tested at the All-Russian Research Institute of Plant Protection (orig.)

Показатель	Феромонная ловушка АО «Щёлково-Агрохим»	Феромонная ловушка ВНИИР
Форма ловушки	Дельтовидная	Кровлеобразная, ромбовидная или дельтовидная
Клейкие вкладыши	Помещаются на дно ловушки	Помещаются на дно ловушки либо отсутствуют, так как энтомологический клей нанесен на внутреннюю поверхность корпуса ловушки
Формы и типы диспенсеров	Резиновые капсулы в виде цилиндра, фольгапленовые пластины или металлические трубки	Резиновые капсулы в виде пробки
Область применения	Изучение фенологии, учет численности, определение сроков химических обработок сельскохозяйственных культур	Изучение фенологии, учет численности, мониторинг и обнаружение карантинных видов
Целевые виды, примеры	Более 50: садовые листовертки, совки, минирующие моли и др.	66 видов: карантинные и аборигенные виды совков, американская белая бабочка, восточная плодовая и др.

В Венгрии установлена отрицательная взаимосвязь между концентрацией газов-поллютантов и отловом самцов вредных чешуекрылых в феромонные ловушки [28]. Эксперименты с отловом томатной моли *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) в Пакистане показали влияние цвета ловушек на отлов (в частности, наибольшее количество самцов было отловлено в ловушки золотистого цвета, тогда как в красных ловушках отмечался наименьший отлов самцов) [29].

Вместе с тем существуют примеры отсутствия влияния некоторых факторов на отлов бабочек. Например, рекомендованное ранее размещение ловушек с южной стороны кроны яблонь увеличило отлов яблонной плодовой моли, но различия были статистически недостоверными с их размещением с северной, западной и восточной сторон [30].

Свет, исходящий от Луны, не влиял на активность лёта вредных чешуекрылых, но при высокой степени поляризации световых лучей уловы ловушек могли увеличиться [31]. Ловушки, расположенные на вершине деревьев (3–5 м), не имели преимуществ по сравнению с ловушками, которые были вывешены на уровне глаз человека (1,6–2,0 м), что доказано для различных их конструкций [32].

В настоящее время проводятся исследования по совершенствованию феромонного мониторинга в нескольких направлениях, одним из которых является комбинация разных аттрактивных компонентов. В частности, одновременное использование диспенсеров с различными СПА или соединение в одном носителе нескольких компонентов СПА разных видов плодовых молей позволяло достичь 98%-ной эффективности, что обеспечивало усовершенствование мониторинга и защиту сельскохозяйственной продукции на протяжении всего вегетационного периода [6, 19, 33].

В России разрабатывается универсальный СПА, который эффективно привлекает вредные виды совок (Lepidoptera: Noctuidae) и жуков-щелкунов (Coleoptera: Elateridae) [20], однако во всех работах отмечается большая доля отлова нецелевых видов при использовании подобных препаратов. Впрочем, Прети и соавт. [34] в 2020 г. успешно апробировали СПА, состоящие из комбинации половых феромонов восточной и яблонной плодовой моли для отлова первой, при этом установлено, что нецелевой вид *Apis mellifera* L. слабо привлекался данным препаратом.

В некоторых странах, например в Китае, продолжают исследования по разработке новых материалов и типов диспенсеров для контролируемого высвобождения СПА. В частности, использование нановолокон, состоящих из смеси полиэтиленгликоля и поликапролактона, позволило в провинции Шаньси обеспечить долгосрочное и равномерное испарение аттрактантов и снизить их расход за 90 дней на 50% при практически такой же биологической эффективности по сравнению с классическими резиновыми капсулами [35].

Рис. 3. Феромонная ловушка с фольгапленовым диспенсером СПА яблонной плодовой моли производства АО «Щёлково-Агрохим», выставленная в яблоневом саду Пушкинского района г. Санкт-Петербурга (ориг.)

Fig. 3. Pheromone trap with foil-film dispenser with SSA for codling moth manufactured by "Shchelkovo-Agrokhim" company, mounted in an apple orchard in the Pushkinsky district of St. Petersburg (orig.)



Среди других иностранных разработок интерес вызывают применение гидрогелей и микрокапсул в качестве носителя феромонного препарата и покрытие диспенсера полимерной пленкой [5, 36].

В России далеко продвинулось в создании новых носителей СПА АО «Щёлково-Агрохим», которое разработало принципиально новую форму — фольгапленовые диспенсеры (рис. 3).

В последние два десятилетия они стали считаться перспективными диспенсерами для проведения феромонного мониторинга в плодовых насаждениях благодаря стабильной эмиссии СПА и сохранению биологической эффективности на протяжении всего времени лёта вредных чешуекрылых [37]. Фольгапленовые диспенсеры так же эффективно, как и резиновая капсула, привлекали самцов целевых видов, при этом не требовали замены и могли применяться в инсектицидно-феромонных композициях, что позволяло существенно снизить затраты труда на обслуживание ловушек [38]. Однако в более позднем исследовании авторов в 2011 г. была показана ограниченность применения фольгапленовых диспенсеров для мониторинга самцов сливовой плодовой моли (*Grapholitha funebrana* Tr.) [39].

Разработкой последних лет АО «Щёлково-Агрохим» является применение в качестве носителей СПА для мониторинга вредных чешуекрылых металлических трубок, полевые испытания которых проводятся на данный момент в ВИЗР.

Совместное применение СПА с другими методами мониторинга позволяет повысить эффективность его проведения. Так, использование феромонных ловушек с ловчими поясами обеспечило синхронный мониторинг имаго, гусениц и куколок яблонной плодовой моли, что позволило определить сроки развития каждого поколения вредителя и даты проведения защитных мероприятий [40].

По мнению ряда авторов, перспективы мониторинга с использованием семиохимиков включают в себя: внедрение и использование полностью автоматизированной системы мониторинга в агробиоценозе для выявления и целенаправленной обработки очагов вредных чешуекрылых; оценку надежности новейших аттрактантов для самок и обоих полов в целях более точной сигнализации сроков откладки яиц и отрождения гусениц; оценку автоматических ловушек в сравнении с ручным подсчетом бабочек в садах; компьютерное определение вида и пола отловленного чешуекрылого; обнаружение новых обонятельных рецепторов, белков, связывающих феромон, и механизмов трансдукции химического сигнала, участвующего в феромонной коммуникации [5, 41, 42].

На данный момент опубликованы положительные результаты практически по всем из выше-названных направлений. Например, канадские ученые Дин и Тейлор [43] представили клеевую ловушку для автоматического обнаружения бабочек, которая содержала феромонную приманку для привлечения целевых насекомых. Цифровые изображения получали с мертвых и живых насекомых в фиксированный момент времени ежедневно, которые затем передавались на удаленный сервер. В статье показана возможность обучить сверхточную нейронную сеть для идентификации самок яблонной плодовой моли.

В России исследования с применением систем искусственного интеллекта на основе нейросетей проводились Алейниковой и др. [44], которые показали точность на уровне 98,6% при уменьшении затрат по времени в зависимости от численности бабочек в 10–40 раз.

Системы подсчета количества отловленных имаго позволяют установить динамику лёта в популяции, имеют относительно недорогую стоимость (примерно 33 долл. США), распространяются по открытой лицензии и имеют потенциал для масштабирования через технологию «интернет вещей» (сети передачи данных между физическими объектами), что было показано в исследовании Шрадера и соавт. в 2022 г. [45]. Подобная система была разработана для гроздовой листовертки *Lobesia botrana* Denis & Schiff. в Турции [46], однако она является более громоздкой и менее портативной, поскольку в качестве источника питания камеры и GPRS-трекера в ней использовались солнечные батареи. При этом китайские испытания СПА показали высокую значимость минорных компонентов феромонов

чешуекрылых в разработке данных систем, особенно основанных на отлове конкретных вредных видов [47].

Проблемой применения подобных ловушек, по мнению Прети и соавт. [48], являются завышенные подсчеты имаго целевых видов из-за схожих по размеру бабочек, что решается внедрением более совершенных алгоритмов идентификации изображений.

В США и Китае прорабатываются методы совместного использования синтетических аттрактантов с растительными компонентами, которые способны привлекать не только самцов, но и самок [36, 49, 50]. Однако подобные смеси имеют существенный недостаток: они были менее эффективны в садах с большой площадью посадок косточковых культур и с обилием сорной растительности [51].

Привлечение самок может достигаться и с использованием пищевых аттрактантов, что в совместном чилийско-американском исследовании [52] обеспечило в среднем четырехдневное улучшение прогноза отрождения гусениц яблонной плодовой моли по сравнению с традиционными половыми аттрактантами (для самцов), но отличие было статистически несущественным.

Наконец, нельзя не сказать и о возможности безловушечного феромонного мониторинга вредных чешуекрылых. Физико-химическое обоснование такого приема описано Ф.Н. Томилиным [53–55].

В перспективе не исключено создание интеллектуальной биосенсорной системы дистанционного обнаружения массового размножения насекомых по концентрации в воздухе их феромонов.

Выводы/Conclusions

Анализ литературных данных последних лет показал прогресс в исследованиях и технологиях применения аттрактантов для целей фитосанитарного мониторинга вредных чешуекрылых.

В мировой практике основными направлениями исследований являются: разработка новых материалов и диспенсеров СПА; выявление факторов, влияющих на отлов феромонными ловушками самцов целевых видов; создание комбинаций половых аттрактантов с другими типами феромонов; внедрение автоматизированных систем мониторинга и подсчета отловленных насекомых в ловушках.

В России большая часть исследований направлена на разработку и испытания собственных СПА (многокомпонентных и универсальных) и носителей феромонов (фольгапленовые пластины и металлические трубки).

Перспективы применения аттрактантов могут быть связаны с внедрением автоматизированного феромонного мониторинга с использованием систем искусственного интеллекта и безловушечных методов проведения мониторинга вредных чешуекрылых.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ВИЗР № FGEU-2025-0001 «Фитосанитарный мониторинг, прогноз и районирование агроландшафтов и агроэкосистем на основе эколого-географического и филогенетического анализа, визуализации и интегративной систематики вредных и полезных организмов».

FUNDING

The research was carried out within the framework of the State Assignment of the All-Russian Research Institute of Plant Protection No. FGEU-2025-0001 "Phytosanitary monitoring, forecasting and zoning of agrolandscapes and agroecosystems based on ecological-geographical and phylogenetic analysis, visualization and integrative taxonomy of harmful and beneficial organisms".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гричанов И.Я., Овсянникова Е.И. Феромоны для фитосанитарного мониторинга вредных чешуекрылых насекомых. СПб.; Пушкин: Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений РАСХН. 2005; 244. ISBN 5-93717-025-3 <https://www.elibrary.ru/rqqlsb>
- Шамшев И.В., Гричанов И.Я. Место феромонов в фитосанитарных технологиях. *Защита и карантин растений*. 2008; (9): 22–23. <https://www.elibrary.ru/lpwrpj>
- Митюшев И.М. Полевой скрининг феромонных препаратов для садовых листоверток. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2014; 39: 143–146. <https://www.elibrary.ru/scxygb>
- Фролов А.Н., Грушевая И.В. Феромониторинг кукурузного мотылька *Ostrinia nubilalis* Hbn. (Lepidoptera: Crambidae) в Краснодарском крае: динамика численности самцов и гусениц на посевах кукурузы. *Вестник защиты растений*. 2017; (1): 55–58. <https://www.elibrary.ru/yrvsoz>
- Whitfield E.C., Fountain M.T. Future semiochemical control of codling moth, *Cydia pomonella*. *Frontiers in Horticulture*. 2024; 3: 1446806. <https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1446806>
- Игнатова Е., Карпун Н., Пятнова Ю., Вендило Н. Пути защиты биocenозов от вредных насекомых на юге России. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2015; (3): 60–63. <https://www.elibrary.ru/txlsty>
- Bento J.M.S., Parra J.R.P., de Miranda S.H.G., Adami A.C.O., Vilela E.F., Leal W.S. How much is a pheromone worth?. *F1000Research*. 2016; 5: 1763. <https://doi.org/10.12688/f1000research.9195.1>
- Guo S., Ge X., Zou Y., Wang T., Zong S. Projecting the Global Potential Distribution of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) Under Historical and RCP4.5 Climate Scenarios. *Journal of Insect Science*. 2021; 21(2). <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab024>
- Акулов Е.Н., Белякова О.В., Кириченко Н.И. Феромонный мониторинг вредоносных чешуекрылых: массовые уловы маньчжурской плодовой в Южной Сибири. *Дендробиотические беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О.А. Катаева). Материалы Всероссийской конференции с международным участием*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. 2020; 53–54. <https://www.elibrary.ru/npvuuu>
- Арутюнян Л.В., Митюшев И.М. Совершенствование феромонного мониторинга яблонной плодовой как перспективного метода контроля вредителя в странах — импортерах российской растительной продукции. *Фитосанитария. Карантин растений*. 2024; (4S-A): 7–8. <https://www.elibrary.ru/oybwrz>
- Petrova V., Dimitrova S., Sotirov D. Productive manifestations and sensitivity to codling moth (*Cydia (Laspeyresia) pomonella* (L.)) of apple cultivars and hybrids. *Agricultural Science and Technology*. 2024; 16(2): 60–66. <https://doi.org/10.15547/ast.2024.02.018>
- Severin D., Iosob G.-A. Enhancing pest control through biological methods: a case study on *Cydia pomonella* L. using pheromonal traps. *Studii și Cercetări Științifice. Seria Biologie*. 2023; 32(2): 81–86.
- Калинина И.А. Применение клеевых и феромонных ловушек для обнаружения и мониторинга насекомых в музеях. *Пест-Менеджмент*. 2022; (1): 22–28. <https://doi.org/10.25732/PM.2022.121.1.003>
- Магомедов У.Ш., Кузин А.А., Ковалев Б.Г., Атанов Н.М., Кузина Н.П. Применение феромонов: состояние вопроса и тенденции. *Защита и карантин растений*. 2009; (11): 36–38. <https://www.elibrary.ru/kxvteh>

REFERENCES

- Grichanov I.Ya., Ovsyannikova E.I. Pheromones for phytosanitary monitoring of lepidoptera pests. St. Petersburg; Pushkin: All-Russian Institute of Plant Protection of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2005; 244 (in Russian). ISBN 5-93717-025-3 <https://www.elibrary.ru/rqqlsb>
- Shamshev I.V., Grichanov I.Ya. The place of pheromones in phytosanitary technologies. *Plant protection and quarantine*. 2008; (9): 22–23 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/lpwrpj>
- Mityushev I.M. Field screening of drugs pheromones for garden leaf rollers. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2014; 39: 143–146 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/scxygb>
- Frolov A.N., Grushevaya I.V. Pheromone traps for monitoring European corn borer *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) in the Krasnodar territory: of male and larval density dynamics on maize fields. *Plant Protection News*. 2017; (1): 55–58 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yrvsoz>
- Whitfield E.C., Fountain M.T. Future semiochemical control of codling moth, *Cydia pomonella*. *Frontiers in Horticulture*. 2024; 3: 1446806. <https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1446806>
- Ignatova E., Karpun N., Pyatnova Yu., Vendilo N. Ways to protect biocenoses from harmful insects in the south of Russia. *International agricultural journal*. 2015; (3): 60–63 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/txlsty>
- Bento J.M.S., Parra J.R.P., de Miranda S.H.G., Adami A.C.O., Vilela E.F., Leal W.S. How much is a pheromone worth?. *F1000Research*. 2016; 5: 1763. <https://doi.org/10.12688/f1000research.9195.1>
- Guo S., Ge X., Zou Y., Wang T., Zong S. Projecting the Global Potential Distribution of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) Under Historical and RCP4.5 Climate Scenarios. *Journal of Insect Science*. 2021; 21(2). <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab024>
- Akulov E.N., Belyakova O.V., Kirichenko N.I. Pheromone monitoring of pestiferous lepidoptera: mass catches of the Manchurian fruit moth in South Siberia. *Dendrobiotic Invertebrates and Fungi and their Role in Forest Ecosystems (The Kataev Memorial Readings — XI). Proceedings of the All-Russian conference with international participation*. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov. 2020; 53–54 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/npvuuu>
- Arutyunyan L.V., Mityushev I.M. Improvement of pheromone monitoring of the apple moth as a promising pest control method in importing countries of Russian plant products. *Plant Health and Quarantine*. 2024; (4S-A): 7–8 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/oybwrz>
- Petrova V., Dimitrova S., Sotirov D. Productive manifestations and sensitivity to codling moth (*Cydia (Laspeyresia) pomonella* (L.)) of apple cultivars and hybrids. *Agricultural Science and Technology*. 2024; 16(2): 60–66. <https://doi.org/10.15547/ast.2024.02.018>
- Severin D., Iosob G.-A. Enhancing pest control through biological methods: a case study on *Cydia pomonella* L. using pheromonal traps. *Scientific Studies & Research. Series Biology*. 2023; 32(2): 81–86.
- Kalinina I.A. Use of glue and pheromone traps for insect detection and monitoring in museums. *Pest Management*. 2022; (1): 22–28 (in Russian). <https://doi.org/10.25732/PM.2022.121.1.003>
- Magomedov U.Sh., Kuzin A.A., Kovalev B.G., Atanov N.M., Kuzina N.P. Application of pheromones: state and trends. *Plant protection and quarantine*. 2009; (11): 36–38 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/kxvteh>

15. Дмитриева С.В., Митюшев И.М. Результаты полевого скрининга феромонных препаратов яблонной плодовой моли в 2019 году. *Материалы Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 160-летию В.А. Михельсона. Сборник статей*. М.: Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева. 2020; 1: 13–16. <https://www.elibrary.ru/mvusbmb>
16. Митюшев И.М. Увеличение теплообеспеченности вегетационного периода как фактор, влияющий на эффективность феромонного мониторинга яблонной плодовой моли. *Фитосанитария. Карантин растений*. 2024; (4S-A): 49. <https://www.elibrary.ru/hrnuvq>
17. Митюшев И.М. Прикладные исследования феромонов насекомых на кафедре защиты растений Российского государственного аграрного университета — МСХА им. К.А. Тимирязева. *Фитосанитария. Карантин растений*. 2024; (2S-A): 85–86. <https://www.elibrary.ru/ivqobn>
18. Агасьева И.С., Исмаилов В.Я., Настасий А.С., Нефедова М.В. Разработка методов применения феромонных материалов для мониторинга и управления численностью фитофагов яблони. *Садоводство и виноградарство*. 2021; (2): 47–53. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2021-2-47-53>
19. Агасьева И.С., Исмаилов В.Я., Нефедова М.В., Настасий А.С., Голобородко Е.О. Изучение межвидовой химической коммуникации для синхронного регулирования численности основных вредителей яблони. *Достижения науки и техники АПК*. 2022; 36(3): 39–44. https://doi.org/10.53859/02352451_2022_36_3_39
20. Исмаилов В.Я., Команцев А.А., Бородин В.И., Исмаилов Э.В., Замотайлов А.С. Разработка препаративных форм феромонов и конструкций феромонных ловушек для мониторинга и массового отлова насекомых. *Биологическая защита растений — основа стабилизации агроэкосистем. Материалы Международной научно-практической конференции*. Краснодар: ЭДВИ. 2024; 12: 166–171. <https://www.elibrary.ru/ajkjqc>
21. Даниленко Е.А., Пименов С.В. Мониторинг и анализ видового разнообразия чешуекрылых семейства *Tortricidae* в условиях зоны достаточного увлажнения Ставропольского края. *Карантин растений. Наука и практика*. 2017; (1): 41–44. <https://elibrary.ru/yspmcd>
22. Абасов М.М., Тодоров Н.Г., Атанов Н.М., Кузина Н.П. Внедрение феромонного мониторинга в практику карантина растений Российской Федерации. *Защита и карантин растений*. 2022; (2): 24–26. https://doi.org/10.47528/1026-8634_2022_2_24
23. Овсянникова Е.И., Гричанов И.Я. Феномен второго поколения сливовой плодовой моли после бесснежной зимы в Ленинградской области. *Защита и карантин растений*. 2021; (3): 27–29. https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_3_27
24. Овсянникова Е.И., Гричанов И.Я. Фенология подкоровой листовертки в Ленинградской области в условиях изменения климата. *Плодоводство и виноградарство юга России*. 2022; 75: 221–230. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-3-75-221-230> EDN: FRNFFX
25. Овсянникова Е.И., Гричанов И.Я., Крохалев Р.С., Николаева З.В., Крюкова А.В., Вендило Н.В. Комплекс плодовых вредителей в садовых агроценозах северо-запада России. *Аграрный научный журнал*. 2024; (10): 47–59. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp47-59>
26. Фролов А.Н., Захарова Ю.А., Малыш С.М. Сквозь сумерки к свету: новый взгляд на вариативность поведенческих реакций яблонной плодовой моли. *Вестник защиты растений*. 2024; 107(2): 40–74. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2024-107-2-16612>
27. Shahir Y. et al. Monitoring of codling moth (*C. pomonella*, Lepidoptera: Tortricidae) using pheromone traps. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*. 2024; 18(10): 48–61.
28. Nowinszky L., Puskás J., Barczikay G. Pheromone Trap Catch of Harmful Microlepidoptera Species in Connection with the Chemical Air Pollutants. *International Journal of Research in Environmental Science*. 2016; 2(1): 1–10.
29. Mangrio G.Q., Gilal A.A., Rajput L.B., Hajano J.-U.-D., Gabol A.H. Performance of pheromone and light traps in monitoring and management of tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2023; 22(5): 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.01.004>
30. Митюшев И.М., Третьяков Н.Н., Вендило Н.В., Плетнев В.А. Изучение влияния различных факторов на эффективность феромонного мониторинга яблонной плодовой моли. *Плодоводство и виноградарство России*. 2012; 30: 393–400. <https://elibrary.ru/oywjyb>
31. Nowinszky L., Puskás J., Barczikay G. The Relationship between Polarized Moonlight and the Number of Pest Microlepidoptera Specimens Caught in Pheromone Traps. *Polish Journal of Entomology*. 2015; 84(3): 163–176. <https://doi.org/10.1515/pjen-2015-0014>
15. Dmitrieva S.V., Mityushev I.M. Results of field screening of codling moth pheromone preparations in 2019. *Proceedings of the International scientific conference of young scientists and specialists dedicated to the 160th anniversary of V.A. Mikhelson. Collection of articles*. Moscow: Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2020; 1: 13–16 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/mvusbmb>
16. Mityushev I.M. Heat increase during the growing period as a factor that influences the efficiency of pheromone monitoring of the codling moth. *Plant Health and Quarantine*. 2024; (4S-A): 49 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/hrnuvq>
17. Mityushev I.M. Applied research of insect pheromones at the Department of Plant Protection of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Plant Health and Quarantine*. 2024; (2S-A): 85–86 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ivqobn>
18. Agasieva I.S., Ismailov V.Ya., Nastasy A.S., Nefedova M.V. Development of methods for application of pheromonic materials for monitoring and managing the number of apple phytophages. *Horticulture and viticulture*. 2021; (2): 47–53 (in Russian). <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2021-2-47-53>
19. Agasyeva I.S., Ismailov V.Ya., Nefedova M.V., Nastasy A.S., Goloborodko E.O. Interspecific chemical communication for synchronisation regulation of the population of the apple tree main pests. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2022; 36(3): 39–44 (in Russian). https://doi.org/10.53859/02352451_2022_36_3_39
20. Ismailov V.Ya., Komantsev A.A., Borodin V.I., Ismailov E.V., Zamotailov A.S. Development of preparative forms of pheromones and designs of pheromone traps for monitoring and mass capture of insects. *Biological Plant Protection is the Basis of Agroecosystems Stabilization. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Krasnodar: EDVI. 2024; 12: 166–171 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ajkjqc>
21. Danilenko E.A., Pimenov S.V. Monitoring and analysis of species diversity of Lepidoptera of the family *Tortricidae* in the conditions of the zone of sufficient moisture of the Stavropol Territory. *Plant health. Research and practice*. 2017; (1): 41–44 (in Russian). <https://elibrary.ru/yspmcd>
22. Abasov M.M., Todorov N.G., Atanov N.M., Kuzina N.P. Introduction of pheromone monitoring to practice of plant quarantine in the Russian Federation. *Plant protection and quarantine*. 2022; (2): 24–26 (in Russian). https://doi.org/10.47528/1026-8634_2022_2_24
23. Ovsyannikova E.I., Grichanov I.Ya. Phenomenon of the second generation of *Grapholita funebrana* after snowless winter in the Leningrad region. *Plant protection and quarantine*. 2021; (3): 27–29 (in Russian). https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_3_27
24. Ovsyannikova E.I., Grichanov I.Ya. Phenology of *Enarmonia formosana* in Leningrad region under climate change. *Fruit growing and viticulture in the South of Russia*. 2022; 75: 221–230 (in Russian). <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-3-75-221-230> EDN: FRNFFX
25. Ovsyannikova E.I., Grichanov I.Ya., Krokhalov R.S., Nikolaeva Z.V., Kryukova A.V., Vendilo N.V. Complex of codling moths in orchard agroecosystems of North-West Russia. *Agrarian scientific journal*. 2024; (10): 47–59 (in Russian). <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp47-59>
26. Frolov A.N., Zakharova Yu.A., Malyshev S.M. Through twilight to the light: a new sight of variability in codling moth behavioral reactions. *Plant Protection News*. 2024; 107(2): 40–74 (in Russian). <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2024-107-2-16612>
27. Shahir Y. et al. Monitoring of codling moth (*C. pomonella*, Lepidoptera: Tortricidae) using pheromone traps. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*. 2024; 18(10): 48–61.
28. Nowinszky L., Puskás J., Barczikay G. Pheromone Trap Catch of Harmful Microlepidoptera Species in Connection with the Chemical Air Pollutants. *International Journal of Research in Environmental Science*. 2016; 2(1): 1–10.
29. Mangrio G.Q., Gilal A.A., Rajput L.B., Hajano J.-U.-D., Gabol A.H. Performance of pheromone and light traps in monitoring and management of tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2023; 22(5): 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.01.004>
30. Mityushev I.M., Tretyakov N.N., Vendilo N.V., Pletnev V.A. Study of the influence of various factors on the efficiency of pheromone monitoring of codling moth. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2012; 30: 393–400 (in Russian). <https://elibrary.ru/oywjyb>
31. Nowinszky L., Puskás J., Barczikay G. The Relationship between Polarized Moonlight and the Number of Pest Microlepidoptera Specimens Caught in Pheromone Traps. *Polish Journal of Entomology*. 2015; 84(3): 163–176. <https://doi.org/10.1515/pjen-2015-0014>

32. Khattak S.U., Howell J.F., White L.D. Pheromone trap height effect on field catch of codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Tropical Pest Management*. 1989; 35(2): 160–162.
<https://doi.org/10.1080/09670878909371348>
33. Knight A. *et al.* Monitoring oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with combinations of pheromones and kairomones. *Journal of Applied Entomology*. 2014; 138(10): 783–794.
<https://doi.org/10.1111/jen.12138>
34. Preti M., Knight A.L., Angeli S. Improved Monitoring of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Stone Fruit Orchards with a Pheromone-Kairomone Combination Lure. *Insects*. 2020; 11(7): 412.
<https://doi.org/10.3390/insects11070412>
35. Xiang H.-M., Wei X.-H., Li Y.-R., Zhang B.-J., Li M., Ma R.-Y. Electrospun nanofibers as controlled release systems for the combined pheromones of *Grapholita molesta* and *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*. 2025; 81(4): 2257–2265.
<https://doi.org/10.1002/ps.8623>
36. Cui G.Z., Zhu J.J. Pheromone-Based Pest Management in China: Past, Present, and Future Prospects. *Journal of Chemical Ecology*. 2016; 42(7): 557–570.
<https://doi.org/10.1007/s10886-016-0731-x>
37. Третьяков Н.Н., Митюшев И.М., Вендило Н.В. Изучение возможности использования феромонных препаратов для мониторинга листоверток в плодовых насаждениях центра России. Доклады ТСХА. М.: Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева. 2005; 277: 174–177.
<https://elibrary.ru/twkcfd>
38. Митюшев И.М. и др. Фольгапленовые диспенсеры — новая препаративная форма для феромонного мониторинга яблонной плодовой. *Агро XXI*. 2008; (10–12): 33–34.
<https://elibrary.ru/kbbxxv>
39. Митюшев И.М., Вендило Н.В., Плетнев В.А. Эффективность мониторинга яблонной и сливовой плодовой в зависимости от состава феромонных диспенсеров и типа ловушек. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2013; 36(2): 41–47.
<https://elibrary.ru/ohoydi>
40. Надыкта В.Д., Ниязов О.Д., Иванова Т.С., Пастарнак И.Н., Пачкин А.А. Совместное применение феромонных ловушек и ловчих поясов для мониторинга яблонной плодовой. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2012; 36: 100–103.
<https://elibrary.ru/pbpyuj>
41. Rizvi S.A.H., George J., Reddy G.V.P., Zeng X., Guerrero A. Latest Developments in Insect Sex Pheromone Research and Its Application in Agricultural Pest Management. *Insects*. 2021; 12(6): 484.
<https://doi.org/10.3390/insects12060484>
42. Гричанов И.Я. Определение массовых видов вредителей по фотографиям с помощью поисковых систем интернета. *Защита и карантин растений*. 2020; (7): 33–35.
<https://elibrary.ru/sexlao>
43. Ding W., Taylor G. Automatic moth detection from trap images for pest management. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 123: 17–28.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.003>
44. Алейникова Н.В., Белаш С.Ю., Радионовская Я.Э., Галкина Е.С., Диденко П.А. Автоматизация феромонного мониторинга гроздовой листовертки в ампелоценозах. Южный урбанистический форум: наука и практика. Сборник научных трудов. Севастополь: Севастопольский государственный университет. 2024; 24–27.
<https://elibrary.ru/fmxosq>
45. Schrader M.J., Smytheman P., Beers E.H., Khot L.R. An Open-Source Low-Cost Imaging System Plug-In for Pheromone Traps Aiding Remote Insect Pest Population Monitoring in Fruit Crops. *Machines*. 2022; 10(1): 52.
<https://doi.org/10.3390/machines10010052>
46. Ünlü L., Akdemir B., Ögür E., Şahin İ. Remote Monitoring of European Grapevine Moth, *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) Population Using Camera-Based Pheromone Traps in Vineyards. *Turkish Journal of Agriculture — Food Science and Technology*. 2019; 7(4): 652–657.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i4.652-657.2382>
47. Chen Q.-H. *et al.* Minor Components Play an Important Role in Interspecific Recognition of Insects: A Basis to Pheromone Based Electronic Monitoring Tools for Rice Pests. *Insects*. 2018; 9(4): 192.
<https://doi.org/10.3390/insects9040192>
48. Preti M., Favaro R., Knight A.L., Angeli S. Remote monitoring of *Cydia pomonella* adults among an assemblage of nontargets in sex pheromone-kairomone-baited smart traps. *Pest Management Science*. 2021; 77(9): 4084–4090.
<https://doi.org/10.1002/ps.6433>
32. Khattak S.U., Howell J.F., White L.D. Pheromone trap height effect on field catch of codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Tropical Pest Management*. 1989; 35(2): 160–162.
<https://doi.org/10.1080/09670878909371348>
33. Knight A. *et al.* Monitoring oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with combinations of pheromones and kairomones. *Journal of Applied Entomology*. 2014; 138(10): 783–794.
<https://doi.org/10.1111/jen.12138>
34. Preti M., Knight A.L., Angeli S. Improved Monitoring of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Stone Fruit Orchards with a Pheromone-Kairomone Combination Lure. *Insects*. 2020; 11(7): 412.
<https://doi.org/10.3390/insects11070412>
35. Xiang H.-M., Wei X.-H., Li Y.-R., Zhang B.-J., Li M., Ma R.-Y. Electrospun nanofibers as controlled release systems for the combined pheromones of *Grapholita molesta* and *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*. 2025; 81(4): 2257–2265.
<https://doi.org/10.1002/ps.8623>
36. Cui G.Z., Zhu J.J. Pheromone-Based Pest Management in China: Past, Present, and Future Prospects. *Journal of Chemical Ecology*. 2016; 42(7): 557–570.
<https://doi.org/10.1007/s10886-016-0731-x>
37. Tret'yakov N.N., Mityushev I.M., Vendilo N.V. Study of the possibility of using pheromone preparations for monitoring leaf rollers in fruit plantations of Central Russia. *Reports of Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev*. Moscow: Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2005; 277: 174–177 (in Russian).
<https://elibrary.ru/twkcfd>
38. Mityushev I.M. *et al.* Foil-and-film dispensers — a new formulation for pheromone monitoring of codling moth. *Агро XXI*. 2008; (10–12): 33–34 (in Russian).
<https://elibrary.ru/kbbxxv>
39. Mityushev I.M., Vendilo N.V., Pletnev V.A. Efficiency of monitoring apple and plum moths depending on the composition of pheromone dispensers and the type of traps. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2013; 36(2): 41–47 (in Russian).
<https://elibrary.ru/ohoydi>
40. Nadykta V.D., Niyazov O.D., Ivanova T.S., Pastarnak I.N., Pachkin A.A. Combined use of pheromone traps and catching belts for codling moth monitoring. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2012; 36: 100–103 (in Russian).
<https://elibrary.ru/pbpyuj>
41. Rizvi S.A.H., George J., Reddy G.V.P., Zeng X., Guerrero A. Latest Developments in Insect Sex Pheromone Research and Its Application in Agricultural Pest Management. *Insects*. 2021; 12(6): 484.
<https://doi.org/10.3390/insects12060484>
42. Grichanov I.Ya. Identification of mass pest species from photos using Internet search engines. *Plant protection and quarantine*. 2020; (7): 33–35 (in Russian).
<https://elibrary.ru/sexlao>
43. Ding W., Taylor G. Automatic moth detection from trap images for pest management. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 123: 17–28.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.003>
44. Aleynikova N.V., Belash S.Yu., Radionovskaya Ya.E., Galkina E.S., Didenko P.A. Automation of pheromone monitoring of grape berry moth in ampeloceneses. *Southern Urban Forum: Science and Practice. Collection of scientific papers*. Sevastopol: Sevastopol State University. 2024; 24–27 (in Russian).
<https://elibrary.ru/fmxosq>
45. Schrader M.J., Smytheman P., Beers E.H., Khot L.R. An Open-Source Low-Cost Imaging System Plug-In for Pheromone Traps Aiding Remote Insect Pest Population Monitoring in Fruit Crops. *Machines*. 2022; 10(1): 52.
<https://doi.org/10.3390/machines10010052>
46. Ünlü L., Akdemir B., Ögür E., Şahin İ. Remote Monitoring of European Grapevine Moth, *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) Population Using Camera-Based Pheromone Traps in Vineyards. *Turkish Journal of Agriculture — Food Science and Technology*. 2019; 7(4): 652–657.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i4.652-657.2382>
47. Chen Q.-H. *et al.* Minor Components Play an Important Role in Interspecific Recognition of Insects: A Basis to Pheromone Based Electronic Monitoring Tools for Rice Pests. *Insects*. 2018; 9(4): 192.
<https://doi.org/10.3390/insects9040192>
48. Preti M., Favaro R., Knight A.L., Angeli S. Remote monitoring of *Cydia pomonella* adults among an assemblage of nontargets in sex pheromone-kairomone-baited smart traps. *Pest Management Science*. 2021; 77(9): 4084–4090.
<https://doi.org/10.1002/ps.6433>

49. Knight A.L., Judd G.L.R., Gilligan T., Fuentes-Contreras E., Walker W.B. Integrated management of tortricid pests of tree fruit. Xu X., Fountain M. (eds.). Integrated management of diseases and insect pests of tree fruit. London: *Burleigh Dodds Science Publishing*. 2019; 377–424.
<https://doi.org/10.1201/9780429266690-16>
50. Knight A.L., Mujica V., Larsson Herrera S., Tasin M. Monitoring codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with a four-component volatile blend compared to a sex pheromone-based blend. *Journal of Applied Entomology*. 2019; 143(9): 942–947.
<https://doi.org/10.1111/jen.12682>
51. Knight A.L., Preti M., Basoalto E. Factors Impacting the Use of an Allelochemical Lure in Pome Fruit for *Cydia pomonella* (L.) Monitoring. *Insects*. 2025; 16(2): 172.
<https://doi.org/10.3390/insects16020172>
52. Barros-Parada W., Knight A.L., Fuentes-Contreras E. Modeling codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) phenology and predicting egg hatch in apple orchards of the Maule Region, Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2015; 75(1): 57–62.
<https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000100008>
53. Томилин Ф.Н. и др. Устойчивость молекул феромонов лесных чешуекрылых к факторам внешней среды. *Биофизика*. 2011; 56(4): 714–722.
<https://elibrary.ru/ojdvah>
54. Артюшенко П.В. и др. Устойчивость феромонов насекомых-ксилофагов к факторам внешней среды: оценка на основе квантово-химического анализа. *Биофизика*. 2017; 62(4): 657–664.
<https://elibrary.ru/ytflxh>
55. Tomilin F.N. *et al.* Estimation of the thermal and photochemical stabilities of pheromones. *Journal of Molecular Modeling*. 2018; 24(11): 323.
<https://doi.org/10.1007/s00894-018-3859-5>

ОБ АВТОРАХ

Роман Сергеевич Крохалев

аспирант

krs0502@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-9637-8750>

Игорь Яковлевич Гричанов

доктор биологических наук, главный научный сотрудник
grichanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6367-836X>

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений,
шоссе Подбельского, 3, Пушкин, Санкт-Петербург,
196608, Россия

49. Knight A.L., Judd G.L.R., Gilligan T., Fuentes-Contreras E., Walker W.B. Integrated management of tortricid pests of tree fruit. Xu X., Fountain M. (eds.). Integrated management of diseases and insect pests of tree fruit. London: *Burleigh Dodds Science Publishing*. 2019; 377–424.
<https://doi.org/10.1201/9780429266690-16>

50. Knight A.L., Mujica V., Larsson Herrera S., Tasin M. Monitoring codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with a four-component volatile blend compared to a sex pheromone-based blend. *Journal of Applied Entomology*. 2019; 143(9): 942–947.
<https://doi.org/10.1111/jen.12682>

51. Knight A.L., Preti M., Basoalto E. Factors Impacting the Use of an Allelochemical Lure in Pome Fruit for *Cydia pomonella* (L.) Monitoring. *Insects*. 2025; 16(2): 172.
<https://doi.org/10.3390/insects16020172>

52. Barros-Parada W., Knight A.L., Fuentes-Contreras E. Modeling codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) phenology and predicting egg hatch in apple orchards of the Maule Region, Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2015; 75(1): 57–62.
<https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000100008>

53. Tomilin F.N. *et al.* Stability of forest lepidopteran pheromones against environmental factors. *Biophysics*. 2011; 56(4): 695–701.
<https://doi.org/10.1134/S0006350911040282>

54. Artyushenko P.V. *et al.* The stability of the pheromones of xylophagous insects to environmental factors: An evaluation by quantum chemical analysis. *Biophysics*. 2017; 62(4): 532–538.
<https://doi.org/10.1134/S0006350917040029>

55. Tomilin F.N. *et al.* Estimation of the thermal and photochemical stabilities of pheromones. *Journal of Molecular Modeling*. 2018; 24(11): 323.
<https://doi.org/10.1007/s00894-018-3859-5>

ABOUT THE AUTHORS

Roman Sergeevich Krokhalov

Graduate Student

krs0502@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-9637-8750>

Igor Yakovlevich Grichanov

Doctor of Biological Sciences, Chief Scientific Officer
grichanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6367-836X>

All-Russian Institute of Plant Protection,
3 Shosse Podbelskogo, Pushkin, St. Petersburg, 196608,
Russia

УДК 633.39: 581.6: 58.00

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-131-137

С.А. Сучкова

С.И. Михайлова

Т.З. Абзалтденов ✉

Национальный исследовательский
Томский государственный
университет, Томск, Россия

✉ vstudenyy@inbox.ru

Поступила в редакцию: 28.07.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Сучкова С.А., Михайлова С.И.,
Абзалтденов Т.З.

Опыт возделывания горца Вейриха в условиях длительной интродукции в Сибирском ботаническом саду

РЕЗЮМЕ

Горец Вейриха (*Polygonum weyrichii* F. Schmidt) — нетрадиционная многолетняя культура многофункционального значения, перспективная для создания плантаций длительного использования в почвенно-климатических условиях подтаежной зоны Западной Сибири. В статье представлены результаты исследования биологических особенностей горца Вейриха. В 2022–2024 годах в коллекционном питомнике Сибирского ботанического сада Томского государственного университета на плантации горца (возраст более 50 лет) определены продолжительность всех этапов развития растений, динамика нарастания побегов, продуктивность зеленой массы и семян. Важным физиологическим показателем растений является характеристика пигментного комплекса. Содержание в листьях суммы хлорофиллов было относительно высоким на протяжении всего периода вегетации (25,94–28,55 мкг/см²). Накопление флавоноидов в эпидермисе листьев увеличивалось с фазы цветения до созревания (1,45–1,88 мкг/см²), индекс азотного баланса изменялся в сторону уменьшения к концу вегетации. В условиях длительного интродукционного эксперимента данный вид проявил себя как устойчивый интродуцент, хорошо адаптированный к местным почвенно-климатическим условиям. Благодаря семенному и вегетативному размножению возможно не только поддержание старой плантации, но и распространение горца Вейриха на новые участки за пределами основной плантации.

Ключевые слова: горец Вейриха, *Polygonum weyrichii*, многолетняя плантация, продуктивность, хлорофилл, флавоноиды, индекс азотного баланса (NBI)

Для цитирования: Сучкова С.А., Михайлова С.И., Абзалтденов Т.З. Опыт возделывания горца Вейриха в условиях длительной интродукции в Сибирском ботаническом саду. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 131–137.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-131-137>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-131-137

Svetlana A. Suchkova

Svetlana I. Mikhailova

Timur Z. Abzaltdenov ✉

Tomsk State University, Tomsk, Russia

✉ vstudenyy@inbox.ru

Received by the editorial office: 28.07.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© Suchkova S.A., Mikhailova S.I.,
Abzaltdenov T.Z.

The experience of cultivating the *Polygonum weyrichii* under conditions of long-term introduction in the Siberian Botanical Garden

ABSTRACT

Polygonum weyrichii F. Schmidt is an unconventional perennial crop of multifunctional importance, promising for creating long-term plantations in the soil and climatic conditions of the taiga zone of Western Siberia. The article presents the results of a study of the biological characteristics of the *Polygonum weyrichii*. In 2022–2024 the duration of all stages of plant development, the dynamics of shoot growth, and the productivity of green mass and seeds have been determined in the collection nursery of the Siberian Botanical Garden of Tomsk State University on a *Polygonum* plantation (age over 50 years). An important physiological indicator of plants is the characteristic of the pigment complex. The total chlorophyll content in the leaves was relatively high throughout the growing season (25.94–28.55 micrograms/cm²). The accumulation of flavonoids in the leaf epidermis increased from the flowering phase to maturation (1.45–1.88 micrograms/cm²), the nitrogen balance index decreased towards the end of the growing season. Under the conditions of a long-term introduction experiment, this species proved to be a stable introducer, well adapted to local soil and climatic conditions. Thanks to seed and vegetative propagation, it is possible not only to maintain the old plantation, but also to spread the *Polygonum weyrichii* to new areas outside the main plantation.

Key words: *Polygonum weyrichii*, perennial plantation, productivity, chlorophyll, flavonoids, nitrogen balance index (NBI)

For citation: Suchkova S.A., Mikhailova S.I., Abzaltdenov T.Z. The experience of cultivating *Polygonum weyrichii* under conditions of long-term introduction in the Siberian Botanical Garden. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 131–137 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-131-137>

Введение/Introduction

Повышение эффективности кормопроизводства и внедрение инновационных разработок предполагают в том числе использование малораспространенных кормовых культур [1–5]. Большой интерес, особенно в условиях ресурсосберегающего земледелия, представляет группа многолетних видов: астрагал нутовый (*Astragalus cicer* L.), горец Вейриха (*Polygonum weyrichii* F. Schmidt), горец забайкальский (*Polygonum divaricatum* L.), клевер паннонский (*Trifolium pannonicum* Jacq.), маралий корень (*Rhaponticum carthamoides* (Willd.) Iljin), свербига восточная (*Bunias orientalis* L.), козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.), силфия пронзеннолистная (*Silphium perfoliatum* L.), топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.) и др. Их преимуществом является долговечность плантаций (5–10 лет и более) в сочетании с высокой продуктивностью и качеством зеленой массы [6–8].

Большая часть перечисленных видов прошла успешные интродукционные испытания в научно-производственных условиях различных регионов России, но не стала в силу разных обстоятельств традиционными кормовыми культурами. Между тем эффективность кормопроизводства может возрасти за счет внедрения инновационных разработок с участием малораспространенных многолетников, прежде всего, в условиях крестьянско-фермерских хозяйств [1, 2]. Этому может способствовать более глубокое изучение эколого-биологических особенностей этих сельскохозяйственных культур, включая перспективные исследования в области физиологии и биохимии, особенно в ответ на стрессовые факторы окружающей среды [9]. Возросший интерес к выращиванию малораспространенных кормовых культур обусловлен новыми направлениями их использования в качестве углероддепонирующих культур [10–12] и источников сырья с высоким содержанием биологически активных веществ [13, 14].

Горец Вейриха — многолетник семейства гречишных (*Polygonaceae*), вид природной флоры Дальнего Востока, представляющий интерес в качестве многофункциональной сельскохозяйственной культуры [15–17]. Благодаря богатому химическому составу зеленая масса горца Вейриха представляет интерес как источник биологически активных веществ для получения фитобиотиков [14] для использования в медицине и ветеринарии. Жидкий экстракт, полученный из надземной части горца, содержит полифенольный комплекс, включающий флавоноиды, и обладает высокой антиоксидантной активностью [18].

С учетом почвенно-климатических особенностей природного ареала данного вида и опыта интродукции в разных зонах России [15, 19, 20] он рекомендован для возделывания прежде всего в

условиях лесной зоны России для размещения в выводных полях севооборота либо на внесевооборотных участках на слабокислых или нейтральных почвах [1].

Цель работы — оценка состояния многолетней плантации горца Вейриха в условиях подтаежной зоны Западной Сибири России.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в коллекционном питомнике сельскохозяйственных культур, расположенном на территории учебно-экспериментального участка Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (СибБС) в 2022–2024 гг. в типичных почвенно-климатических условиях подтаежной зоны Западной Сибири (г. Томск, Россия).

Объект исследований — многолетняя плантация горца Вейриха, заложенная в 70-х годах XX века [21] (рис. 1). Площадь плантации 530 м².

Для проведения исследований использовали методику полевого опыта¹, методику фенологических наблюдений интродуцентов² и статистической обработки данных³. Определение посевных качеств семян горца, находившихся в условиях неконтролируемого хранения в семенотеке СибБС, проводили в весенний период согласно методическим рекомендациям⁴.

Наблюдения за ростом и развитием горца осуществляли на протяжении всего вегетационного периода — от начала отрастания до созревания семян.

Учет урожайности зеленой массы проводили в фазу массового цветения по 4 повторностям на площади 10 м².

Почва на плантации горца серая лесная средне-суглинистая по механическому составу. Содержание подвижного фосфора — 219 мг/кг, подвижного

Рис. 1. Плантация горца Вейриха в Сибирском ботаническом саду. Фото авторов

Fig. 2. The plantation of *Polygonum weyrichii* in the Siberian Botanical Garden. Photos of the authors



¹ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос. 1985; 351.

² Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. Москва. 1975; 28.

³ Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука. 1984; 424.

⁴ ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.

калия — 85 мг/кг, общего азота — 4 мг/кг, pH = 4,5. Содержание гумуса — 2,9%.

Для измерения физиологических параметров в листьях применяли метод фотометрической экспресс-диагностики. Содержание суммы хлорофиллов, флавоноидов и азотного индекса определяли на флавоноид- и хлорофиллометре Dualex 4 (Франция). Прибор позволяет точно и в режиме реального времени измерять содержание флавоноидов в эпидермисе растений и хлорофиллов в мезофилле листа. Показатель Nitrogen Balance Index (NBI) — индекс азотного баланса растений, представляет соотношение количества хлорофилла и флавоноидов (азота/углерода). Измерения проводятся в диапазоне от 0,00 до 3,00 мкг/см²; точность абсорбции — 5% [22].

Накопление суммы хлорофиллов, флавоноидов и индекс азотного баланса в листьях горца определяли в течение вегетационного периода 2023 года.

Климат подтаежной зоны Западной Сибири континентальный с влажным умеренно теплым летом и холодной снежной продолжительной зимой. Он характеризуется наличием поздних весенних и ранних осенних заморозков, ограничивающих и без того короткий период вегетации культурных растений. Продолжительность безморозного периода 86–148 дней. Сумма биологически активных температур воздуха выше 5 °C составляет 1378 °C. Среднегодовое количество осадков — 535 мм.

Погодные условия в годы проведения исследований существенно отличались по тепло- и влагообеспеченности. В 2022 году ГТК составил 1,38, что определяет вегетационный период как избыточно увлажненный и умеренно теплый. В 2023 году ГТК составил 1,06, обеспеченного увлажнения и умеренно теплый. В 2024 году вегетационный период проходил в условиях избыточного увлажнения и был умеренно теплый, ГТК составил 1,82⁵.

Статистическую обработку результатов исследований проводили методом дисперсионного анализа с использованием стандартного пакета Microsoft Excel 2016 (США).

В таблицах представлены средние арифметические значения в форме «среднее ± ошибка среднего», «коэффициент вариации (CV)» по морфологическим параметрам от 25 до 40 биологических повторностей.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В условиях СибБС горец Вейриха проходит полный цикл развития. Вегетация начинается в конце апреля — начале мая и заканчивается с наступлением устойчивых заморозков (табл. 1).

Наиболее интенсивный рост побегов наблюдается до конца июня — начала июля (табл. 2).

Достоинством горца является высокая урожайность зеленой массы (5–7 кг/м²), которая формируется на 3-й год возделывания и поддерживается

Таблица 1. Наступление фенологических фаз горца Вейриха, 2022–2024 гг.

Table 1. The onset of the phenological phases of *Polygonum weyrichii*, 2022–2024

Фазы развития	Годы наблюдений		
	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Начало отрастания	05.05	24.04	22.04
Полная розетка листьев	16.05	18.05	15.05
Начало роста стебля	28.05	28.05	20.05
Начало бутонизации	11.06	12.06	8.06
Массовая бутонизация	14.06	19.06	12.06
Начало цветения	20.06	22.06	15.06
Массовое цветение	30.06	26.06	20.06
Начало плодоношения	20.07	25.07	24.07
Созревание семян	20.09	20.09	10.09
Длина вегетационного периода, дн.	154	149	147

Таблица 2. Рост побегов горца Вейриха в течение вегетационного периода, 2022–2024 гг.

Table 2. Growth of *Polygonum weyrichii* shoots during the growing season, 2022–2024

Месяц	Декада	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Май	III	54,6 ± 4,5	61,2 ± 3,9	70,4 ± 5,2
	I	110,7 ± 9,4	122,7 ± 11,5	126 ± 10,3
Июнь	II	169,8 ± 13,9	158,6 ± 10,8	173 ± 14,7
	III	207,9 ± 14,6	196,1 ± 18,2	200,1 ± 17,9
Июль	I	231,1 ± 19,0	236,5 ± 20,8	232,6 ± 21,3
	II	243,5 ± 21,3	241,3 ± 15,4	248,7 ± 20,1
	III	249,8 ± 17,1	243,0 ± 19,6	262,1 ± 23,4

Таблица 3. Морфометрические показатели побегов и урожайность горца Вейриха (2022–2024 гг.)

Table 3. Morphometric indicators of shoots and yields of *Polygonum weyrichii* (2022–2024)

Показатели	X ± m _x
Число листьев, шт.	11,2 ± 0,3
Масса побега, г	345,7 ± 19,5
Масса листьев, г	126,0 ± 9,3
Масса стебля, г	219,7 ± 12,8
Облиственность, %	36,4 ± 1,4
Урожайность зеленой массы, кг/м ²	6,2 ± 0,4
Масса плодов, г:	
одного побега	18,8 ± 0,8
1000 шт.	4,2 ± 0,2
Масса семян, г:	
одного побега	14,3 ± 0,9
1000 шт.	3,2 ± 0,1

на таком уровне в течение нескольких десятилетий при условии правильной эксплуатации (однократного скашивания в течение вегетационного сезона).

В период массового цветения — начала плодоношения побеги горца достигают максимального развития и характеризуются высокой облиственностью (табл. 3).

Важным физиологическим показателем растений является характеристика пигментного комплекса. Содержание в листьях суммы хлорофиллов было относительно высоким на протяжении всего периода вегетации (25,94–28,55 мкг/см²).

⁵ Мониторинг погоды и климата России, СНГ и мира [электронный ресурс]. — URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 22.06.2025).

Накопление флавоноидов в эпидерме листьев увеличивалось с фазы цветения до созревания ($1,45\text{--}1,88\text{ мкг/см}^2$), индекс азотного баланса изменялся в сторону уменьшения к концу вегетации (табл. 4). Эти данные подтверждают исследования Е.В. Калмыковой с соавт. [23], свидетельствующие о том, что в период активного роста листьев показатели хлорофиллов и индекса азотного баланса довольно высоки, а к концу вегетации происходит снижение содержания хлорофиллов а + b и уровня индекса азотного баланса.

В экспериментальных посевах СибБС данный вид отличается долголетием и высокой продуктивностью. Многолетняя плантация горца сохраняются за счет регулярного семенного и вегетативного возобновления. Следует отметить, что на данной плантации ежегодно формируются полноценные семена горца Вейриха (рис. 2).

Свежесобранные семена горца Вейриха находятся в состоянии физиологического покоя и нуждаются в длительной стратификации [24]. Как показали лабораторные исследования, свежесобранные семена данного вида находятся в покое, из которого выходят в процессе хранения. После года хранения энергия прорастания семян составляет 64,5%, а всхожесть — 86,1%. Семена горца Вейриха недолговечны и после двух лет хранения теряют всхожесть, что согласуется с полученными ранее данными [25].

Горец Вейриха в условиях Сибирского ботанического сада ТГУ обладает высокой устойчивостью в культуре благодаря исключительно долголетию и способности поддерживать самовозобновление популяции семенным и вегетативным способами (рис. 3).

Благодаря двум способам возобновления возможно не только поддержание многолетней плантации, но и распространение горца на новые участки за пределами основного участка возделывания. Авторами были обнаружены немногочисленные молодые особи горца Вейриха, отделившиеся от взрослых растений с помощью корневищ. Они были отмечены по краям плантации горца. Длина корневищ составила от 25 до 30 см, а диаметр — от 8 до 10 мм (рис. 3Б).

Более эффективным способом распространения горца вне зоны возделывания является семенной способ размножения. Немногочисленные растения горца семенного происхождения были обнаружены на расстоянии 5–7 м от основной плантации. Постепенно это привело к небольшому расширению площади горца с вытеснением таких многолетних видов, как окопник шероховатый (*Symphytum asperum* Лереш.), и образованием зарослей в благоприятных условиях (вдоль русла ручья).

Способность горца Вейриха незначительно распространяться за пределы места культивирования наблюдается исключительно в условиях интродукционного эксперимента. Соблюдение технологий возделывания горца в лекарственных или кормовых целях, предполагающих уборку зеленой массы в фазу цветения, исключает его «убегание из культуры».

Таблица 4. Динамика содержания суммы хлорофиллов и флавоноидов в листьях горца Вейриха (2023 г.)

Table 4. Dynamics of the amount of chlorophylls and flavonoids in the leaves of *Polygonum weyrichii* (2023)

Дата измерений	Сумма хлорофиллов, мкг/см ²	Флавоноиды, мкг/см ²	Индекс азотного баланса (NBI)
05.06.2023	$26,89 \pm 0,49$ 16,30	$1,59 \pm 0,03$ 14,19	$17,15 \pm 0,33$ 17,36
09.06.2023	$27,97 \pm 0,26$ 9,66	$1,42 \pm 0,02$ 15,13	$20,06 \pm 0,30$ 15,44
26.06.2023	$25,95 \pm 0,41$ 14,26	$1,45 \pm 0,02$ 13,61	$18,17 \pm 0,39$ 19,14
11.07.2023	$24,73 \pm 0,58$ 16,69	$1,63 \pm 0,02$ 8,92	$14,98 \pm 0,28$ 13,17
19.07.2023	$28,55 \pm 0,57$ 10,91	$1,79 \pm 0,02$ 7,07	$16,09 \pm 0,48$ 16,26
02.08.2023	$25,94 \pm 0,65$ 13,83	$1,72 \pm 0,03$ 8,07	$15,16 \pm 0,48$ 17,02
31.08.2023	$26,35 \pm 0,65$ 13,11	$1,88 \pm 0,01$ 3,49	$14,01 \pm 0,37$ 12,15

Примечание: в числителе — средняя арифметическая и ошибка средней, в знаменателе — коэффициент вариации (CV).

Рис. 2. Плоды и семена горца Вейриха. Фото авторов

Fig. 2. Fruits and seeds of *Polygonum weyrichii*. Photos of the authors

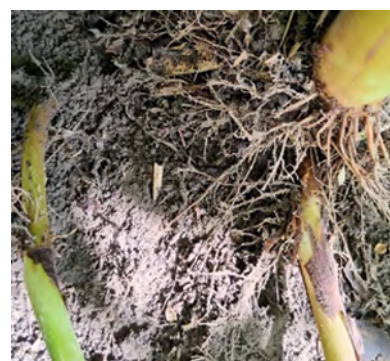


Рис. 3. Семенное (а) и вегетативное (б) размножение горца Вейриха на старовозрастной плантации Сибирского ботанического сада. Фото авторов

Fig. 3. Seed (a) and vegetative (b) reproduction of *Polygonum weyrichii* on the old-growth plantation of the Siberian Botanical Garden. Photos of the authors



а (a)



б (b)

Выводы/Conclusions

В условиях длительного интродукционно-го эксперимента, проводимого в условиях Сибирского ботанического сада (г. Томск), горец Вейриха проявил высокую адаптивную устойчивость к местным почвенно-климатическим условиям. Вегетационный период составляет 147–154 дня. Наиболее интенсивный рост побегов отмечается в конце июня — начале июля и составляет от 243,0 до 262,1 см. Урожайность зеленой массы — от 5 до 7 кг/м². Свежесобранные семена находятся в покое, а после года хранения имеют высокие посевные качества (энергия прорастания — 64,5%, всхожесть — 86,1%).

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 государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0006).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шпаков А.С. Кормопроизводство в крестьянско-фермерских хозяйствах лесной зоны. *Адаптивное кормопроизводство*. 2024; (4): 68–74. <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2024-4-68-74>
2. Шкодина Е.П. Инновационные элементы в организации зеленого конвейера. *Аграрная наука*. 2020; (11–12): 68–71. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-68-71>
3. Андреева О.Т. Продуктивность кормовых агроценозов традиционных и малораспространенных культур в одновидовых и поливидовых посевах для производства сенажа в лесостепи Забайкалья. *Достижения и перспективы развития кормопроизводства в Сибири: Сборник региональной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Сибирского научно-исследовательского института кормов СФНЦА РАН*. Новосибирск: Золотой колос. 2025; 11–14. <https://elibrary.ru/dcnvki>
4. Боголюбова Е.В. Продуктивное долголетие лугового агроценоза при подсеве клевера среднего (*Trifolium Medium*) в Приобской лесостепи. *Достижения и перспективы развития кормопроизводства в Сибири: Сборник региональной научно-практической конференции, посвященной 55-летию Сибирского научно-исследовательского института кормов СФНЦА РАН*. Новосибирск: Золотой колос. 2025; 30–33. <https://elibrary.ru/bnxdbi>
5. Магомедов К.Г., Камиллов Р.К., Козырев А.Х., Алиев С.А. Меры по стабилизации кормопроизводства на Северном Кавказе. *Научно-технический и социально-экономический потенциал развития АПК РФ: Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки КБР, заслуженного агронома Российской Федерации д-ра с.-х. наук, профессора М.Х. Ханиева*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова. 2024; 146–150. <https://elibrary.ru/ffwzby>
6. Кшникаткина А.Н., Москвин А.И. Диверсификация нетрадиционных растений — важнейший фактор устойчивого развития кормопроизводства. *Нива Поволжья*. 2016; (3): 49–60. <https://elibrary.ru/ypsmwx>
7. Капсамун А.Д., Павлючик Е.Н., Иванова Н.Н. Сравнительная оценка питательной ценности кормов из малораспространенных силосных культур. *Аграрная наука*. 2023; (6): 71–75. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-71-75>
8. Чупина М.П., Степанов А.Ф. Эффективность возделывания многолетних малораспространенных кормовых культур в Западной Сибири. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2024; (3): 33–40. <https://elibrary.ru/wajhrd>
9. Думачева Е.В., Чернявских В.И., Сайфутдинова Л.Д., Печегина Ю.В., Гребенников А.А. Перспективы использования результатов изучения фотосинтеза в селекции растений: обзор основных направлений исследований. *Кормопроизводство*. 2024; (4): 18–29. <https://elibrary.ru/rnvxxk>

Содержание в листьях суммы хлорофиллов высокое на протяжении всего периода вегетации (25,94–28,55 мкг/см²). Накопление флавоноидов в эпидерме листьев увеличивается с фазы цветения до созревания (1,45–1,88 мкг/см²). Максимальный индекс азотного баланса отмечается в начале фазы бутонизации (20,06) и уменьшается к периоду плодоношения (14,01).

В условиях интродукционного эксперимента долговечность плантации горца осуществляется в основном благодаря семенному размножению. Способность вида незначительно распространяться за пределами многолетних интродукционных плантаций, заложенных в ботанических садах, требует систематического наблюдения.

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 study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2024-0006).

REFERENCES

1. Shpakov A.S. Fodder production in peasant-farmers farms of the forest zone. *Adaptive Fodder Production*. 2024; (4): 68–74 (in Russian). <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2024-4-68-74>
2. Shkodina E.P. Innovative elements in the organization of a green conveyor. *Agrarian science*. 2020; (11–12): 68–71 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-343-11-68-71>
3. Andreeva O.T. Productivity of forage agroecosystems of traditional and less common crops in single- and multi-species crops for silage production in the forest-steppe of Transbaikalia. *Achievements and Prospects for the Development of Forage Production in Siberia: Proceedings of the regional scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the Siberian Research Institute of Forage, Siberian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2025; 11–14 (in Russian). <https://elibrary.ru/dcnvki>
4. Bogolyubova E.V. Productive longevity of meadow agroecosystem with underseeding of medium clover (*Trifolium Medium*) in the Ob forest-steppe. *Achievements and prospects for the development of forage production in Siberia: Proceedings of the regional scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the Siberian Research Institute of Forage, Siberian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2025; 30–33 (in Russian). <https://elibrary.ru/bnxdbi>
5. Magomedov K.G., Kamilov R.K., Kozirev A.Kh., Aliev S.A. Measures to stabilize forage production in the North Caucasus. *Scientific, technical and socio-economic potential for the development of the agro-industrial complex of the Russian Federation: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Honored Scientist of the Kabardino-Balkarian Republic, Honored Agronomist of the Russian Federation Doctor of Agricultural Sciences, Professor Professor M. Kh. Khaniev*. Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 2024; 146–150 (in Russian). <https://elibrary.ru/ffwzby>
6. Kshnikatkina A.N., Moskvina A.I. Diversification of non-traditional crops is the essential factor for sustainable development of fodder production. *Niva Povolzhya*. 2016; (3): 49–60 (in Russian). <https://elibrary.ru/ypsmwx>
7. Kapsamun A.D., Pavlyuchik E.N., Ivanova N.N. Comparative assessment of the nutritional value of feed from rare silage crops. *Agrarian science*. 2023; (6): 71–75 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-71-75>
8. Chupina M.P., Stepanov A.F. Efficiency of cultivation of perennial rare forage crops in Western Siberia. *Vestnik of Omsk SAU*. 2024; (3): 33–40 (in Russian). <https://elibrary.ru/wajhrd>
9. Dumacheva E.V., Chernyavskikh V.I., Sayfutdinova L.D., Pechegina Yu.V., Grebennikov A.A. Prospects of using the results of photosynthesis studies in plant breeding: a review of the main directions of research. *Feed Production*. 2024; (4): 18–29 (in Russian). <https://elibrary.ru/rnvxxk>

10. Valdayskikh V.V., Artemyeva E.P., Karpukhin M.Yu., Mikhailishchev R.V. Comparative yield of large-herb plants when grown in the Middle Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; (11): 2–7. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-214-11-2-7>
11. Артемьева Е.П., Валдайских В.В., Радченко Т.А., Карпукhin М.Ю. Перспективы выращивания высокотравных растений в качестве углероддепонирующих культур. *Аграрный вестник Урала*. 2022; (12): 2–10. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10>
12. Завьялова Н.Е., Майсак Г.П., Казакова И.В., Иванова О.В. Фотосинтетическая и углеродсеквестрирующая способность левзеи сафлоровидной и накопление органического углерода в дерново-подзолистой почве. *Агрохимия*. 2024; (7): 48–56. <https://doi.org/10.31857/S0002188124070073>
13. Давидянц Э.С. Тriterпеновые гликозиды как регуляторы роста растений: потенциал и перспективы использования (обзор). *Химия растительного сырья*. 2023; (1): 5–34. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111368>
14. Коровкина А.В., Цветов Н.С., Михайлова С.И. Влияние климатических условий на накопление биологически активных соединений растения *Koenigia weyrichii*. *Химия растительного сырья*. 2022; (4): 249–258. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220411384>
15. Михайлова С.И., Сучкова С.А., Астафурова Т.П. Перспективные направления использования горца Вейриха (*Polygonum weyrichii*) и его инвазивный потенциал. *Вестник КрасГАУ*. 2024; (4): 20–28. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-4-20-28>
16. Цугкиев Б.Г., Хозиев А.М., Албегова З.В. Результаты исследования состава зеленой массы горца Вейриха в различные фазы вегетации. *Инновационные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Материалы Всероссийской научно-практической конференции в честь 90-летия кафедры кормления, разведения и генетики сельскохозяйственных животных и кафедры частной зоотехнии факультета технологического менеджмента Горского государственного аграрного университета*. Владикавказ: Горский государственный аграрный университет. 2021; (2): 16–18. <https://elibrary.ru/trysz>
17. Хозиев А.М. Биологический потенциал и перспективы использования Горца Вейриха. *Инновационные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Материалы Всероссийской научно-практической конференции в честь 90-летия факультета технологического менеджмента*. Владикавказ: Горский государственный аграрный университет. 2019; (1): 409–412. <https://elibrary.ru/quwogk>
18. Коровкина А.В., Койгерова А.А., Цветов Н.С., Мизина П.Г. Оптимизация условий ультразвуковой экстракции полифенольных соединений из соцветий *Koenigia weyrichii* (F. Schmidt) T.M. Schust. et Reveal. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2025; 28(1): 30–40. <https://doi.org/10.29296/25877313-2025-01-04>
19. Зайнуллина К.С. Интродукция кормовых растений в Республике Коми. *Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН*. 2008; (7): 37–39. <https://elibrary.ru/vrtryb>
20. Паутова И.А. Многолетние растения в условиях длительной интродукции на северо-западе России. *Биологическое разнообразие. Интродукция растений. Материалы VI Международной научной конференции*. СПб.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН. 2016; 219–223. <https://elibrary.ru/xwaaiv>
21. Плотников И.И. Крупнотравные многолетние кормовые растения в Сибирском ботаническом саду. *Бюллетень Сибирского ботанического сада*. 1978; 11: 60–72.
22. Cerovic Z.G., Masdournier G., Ghazlen N.B., Latouche G. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum*. 2012; 146(3): 251–260. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x>
23. Калмыкова Е.В., Мельник К.А., Передриенко А.И. Динамика физиологического состояния древесно-кустарниковых растений в течение вегетационного периода в условиях сухой степи Волгоградской области. *Аграрный научный журнал*. 2025; (2): 29–36. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i2pp29-36>
24. Воронкова Н.М., Холина А.Б., Журавлев Ю.Н., Сундукова Е.В. Размножение растений российского Дальнего Востока. Владивосток: ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН. 2023; 235. ISBN 978-5-6048441-9-9 <https://doi.org/10.25221/seeds>
25. Лаврик И.П. Определение потенциальной долговечности семян горца Вейриха, горца забайкальского и сильфии пронзеннолистной ускоренным старением. *Доклады ТСХА. Материалы Международной научной конференции. М.: Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева*. 2017; 289(1): 118–119. <https://elibrary.ru/yrvswv>
10. Valdayskikh V.V., Artemyeva E.P., Karpukhin M.Yu., Mikhailishchev R.V. Comparative yield of large-herb plants when grown in the Middle Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; (11): 2–7. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2021-214-11-2-7>
11. Artemyeva E.P., Valdayskikh V.V., Radchenko T.A., Karpukhin M.Yu. The prospects of growing large-herb plants as carbon-depositing crops. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022; (12): 2–10 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10>
12. Zavyalova N.E., Maysak G.P., Kazakova I.V., Ivanova O.V. Photosynthetic and Carbon Sequestering Ability of Safflower *Leucea* and Accumulation of Organic Carbon in Sod-Podzolic Soil. *Agricultural Chemistry*. 2024; (7): 48–56 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188124070073>
13. Davidyants E.S. Triterpene Glycosides as Plant Growth Regulators: Application Potential and Prospects (A Review). *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2024; 50(7): 2730–2752. <https://doi.org/10.1134/S1068162024070100>
14. Korovkina A.V., Tsvetov H.C., Mikhaylova S.I. The influence of climatic conditions on accumulation of biologically active compounds in *Koenigia weyrichii*. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2022; (4): 249–258 (in Russian). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220411384>
15. Mikhailova S.I., Suchkova S.A., Astafurova T.P. Promising areas of *Polygonum weyrichii* use and its invasive potential. *Bulletin of KrasGAU*. 2024; (4): 20–28 (in Russian). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-4-20-28>
16. Tsugkiev B.G., Khoziev A.M., Albegova Z.V. Results of a study of the green mass composition of Weirich's knotweed during different phases of vegetation. *Innovative technologies for the production and processing of agricultural products. Materials of the All-Russian Scientific and Practical conference in honor of the 90th anniversary of the Department of Feeding, Breeding and Genetics of Farm Animals and the Department of Private Zootechny of the Faculty of Technological Management of the Gorsky State Agrarian University*. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University. 2021; (2): 16–18 (in Russian). <https://elibrary.ru/trysz>
17. Khoziev A.M. Biological potential and prospects for the use of Weirich's knotweed. *Innovative technologies for the production and processing of agricultural products. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference in honor of the 90th anniversary of the faculty of technological management*. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University. 2019; (1): 409–412 (in Russian). <https://elibrary.ru/quwogk>
18. Korovkina A.V., Koigerova A.A., Tsvetov N.S., Mizina P.G. Optimization of the conditions of ultrasonic extraction of polyphenolic compounds from the inflorescences of *Koenigia weyrichii* (F. Schmidt) T.M. Schust. et Reveal. *Problems of biological, medical and pharmaceutical chemistry*. 2025; 28(1): 30–40 (in Russian). <https://doi.org/10.29296/25877313-2025-01-04>
19. Zaynullina K.S. Introduction of fodder plants in the Komi Republic. *Vestnik Instituta biologii Komi NTS Uro RAN*. 2008; (7): 37–39 (in Russian). <https://elibrary.ru/vrtryb>
20. Pautova I.A. Perennial plants under conditions of prolonged introduction at North-West of Russia. *Biological diversity. Introduction of plants. Proceedings of the 6th International scientific conference*. St. Petersburg: Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. 2016; 219–223 (in Russian). <https://elibrary.ru/xwaaiv>
21. Plotnikov I.I. Large-herbed perennial forage plants in the Siberian Botanical Garden. *Byulleten' Sibirskogo botanicheskogo sada*. 1978; 11: 60–72 (in Russian).
22. Cerovic Z.G., Masdournier G., Ghazlen N.B., Latouche G. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum*. 2012; 146(3): 251–260. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x>
23. Kalmykova E.V., Melnik K.A., Peredrienko A.I. Dynamics of the physiological state of wood and shrub plants during the growing period under conditions of the dry steppe of the Volgograd Region. *Agrarian Scientific Journal*. 2025; (2): 29–36 (in Russian). <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i2pp29-36>
24. Voronkova N.M., Kholina A.B., Zhuravlev Yu.N., Sundukova E.V. Reproduction of the Russian Far East plants. Vladivostok: FSC of Biodiversity FEB RAS. 2023; 235 (in Russian). ISBN 978-5-6048441-9-9 <https://doi.org/10.25221/seeds>
25. Lavrik I.P. Determination of potential longevity of seeds of Weirich's knotweed, Transbaikalian knotweed and Silphium perforatum by accelerated aging. *Reports of the Timiryazev Agricultural Academy. Proceedings of the International Scientific Conference*. Moscow: Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2017; 289(1): 118–119 (in Russian). <https://elibrary.ru/yrvswv>

ОБ АВТОРАХ

Светлана Александровна Сучкова

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Сибирского ботанического сада
suchkova.s.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4079-3389>

Светлана Ивановна Михайлова

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирского ботанического сада
mikhailova.si@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4595-2032>

Тимур Зафарович Абзалтденов

младший научный сотрудник Сибирского ботанического сада
vstudenyy@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0004-5686-9300>

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр-т Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Svetlana Alexandrovna Suchkova

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher at the Siberian Botanical Garden
suchkova.s.a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4079-3389>

Svetlana Ivanovna Mikhailova

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Siberian Botanical Garden
mikhailova.si@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4595-2032>

Timur Zafarovich Abzaltdenov

Junior Researcher at the Siberian Botanical Garden
vstudenyy@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0004-5686-9300>

Tomsk State University,
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

УДК 51:629.3.014.2.032

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-138-143

С.В. Тарасова

Е.М. Асманкин

Ю.А. Ушаков ✉

П.А. Иванов

Е.В. Нейфельд

В.А. Ротова

Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

✉ 1u6j1a159@mail.ru

Поступила в редакцию: 29.07.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Тарасова С.В., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Иванов П.А., Нейфельд Е.В., Ротова В.А.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-138-143

Saria V. Tarasova

Evgeny M. Asmankin

Yuriy A. Ushakov ✉

Pavel A. Ivanov

Elena V. Neifeld

Victoria A. Rotova

Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

✉ 1u6j1a159@mail.ru

Received by the editorial office: 29.07.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© Tarasova S.V., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Ivanov P.A., Neifeld E.V., Rotova V.A.

Метод расчета частот и форм собственных колебаний 14-массовой крутильно-колебательной системы мобильного энергетического средства с орудием при выполнении технологических операций на склоне

РЕЗЮМЕ

Устойчивость движения колесных тракторов является одним из основных факторов, способствующих уменьшению энергозатрат. Современные разработки, связанные с усовершенствованием конструкции сельскохозяйственных тракторов, решая проблемы повышения их эффективности, сталкиваются с рядом трудностей, обусловленных нестабильными процессами при движении по наклонным опорным поверхностям. Вопрос модернизации конструкции трактора следует рассматривать в параметрическом аспекте на реализацию собственной частоты и формы колебаний, которые влияют на его устойчивость движения в технологическом коридоре. Проведенные расчетно-теоретические исследования механических процессов силовой передачи самоходного шасси класса 1.4 классической компоновки с разработанной укрупненной расчетной схемой трактора «Беларус 952.3» (для 14 элементов распределенной массы) в агрегате с культиватором КРН-5,6 легли в основу создания методики расчета частоты и формы собственных колебаний. Система «Машино-тракторный агрегат (МТА)» имеет довольно большое значение частоты свободных колебаний, которое позволяет рассчитать условия работы конструкции на длительных эксплуатационных режимах при частотах, близких к резонансным. Изменение спектра частоты собственных колебаний системы может служить дополнительному износу деталей, шин и т. п. При исследовании разрабатываемой системы «МТА» был принят за основу метод, описанный профессором В.А. Лашко, а также применен матричный метод. Матричные формы записи уравнений движения крутильно-колебательной системы «МТА» со многими степенями свободы удобны для расчетов по определению амплитудно-частотных характеристик. Для расчета крутильно-колебательной системы силовой передачи самоходного шасси, агрегатированного с культиватором, разработана динамическая модель, представляющая вариационные возможности анализа сочетания исследуемых факторов и параметров.

Ключевые слова: самоходное шасси, культиватор, технологический коридор, устойчивость трактора, движение по наклонной поверхности, динамическая модель, матричный метод

Для цитирования: Тарасова С.В., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Иванов П.А., Нейфельд Е.В., Ротова В.А. Метод расчета частот и форм собственных колебаний 14-массовой крутильно-колебательной системы мобильного энергетического средства с орудием при выполнении технологических операций на склоне. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 138–143. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-138-143>

A method for calculating the frequencies and forms of natural vibrations of a 14-mass torsion-oscillating system of a mobile power tool with a tool when performing technological operations on a slope

ABSTRACT

The stability of movement of wheeled tractors is one of the main factors contributing to the reduction of energy costs. Modern developments related to the improvement of the design of agricultural tractors, solving the problems of increasing their efficiency face a number of difficulties caused by unstable processes when moving on inclined support surfaces. The issue of modernizing the tractor design should be considered in the parametric aspect of the implementation of its own frequency and shape of oscillations that affect its stability of movement in the technological corridor. A complex task to improve the manufacturability of the tractor must necessarily take into account the fact that new elements change the entire system. Therefore, at the stage of developing a new or modernizing a serial mobile machine, reliability is necessary when determining the dynamic characteristics. The conducted calculation and theoretical studies of the mechanical processes of the power transmission of a self-propelled chassis of class 1.4 of the classic layout with the developed enlarged calculation scheme of the "Belarus 992" tractor (for fourteen elements of distributed mass) in an aggregate with a KRN-5.6 cultivator. Formed the basis for the creation of a method for calculating the frequency and shape of natural oscillations. The "Machine-tractor unit (MTU)" system has a fairly high value of the frequency of free oscillations, which allows calculating the operating conditions of the structure in long-term operating modes at frequencies close to resonance. A change in the spectrum of the frequency of natural oscillations of the system can serve as an additional wear of parts, tires, etc. When studying the developed "MTU" system, the method described by Professor V.A. Lashko was taken as a basis, and the matrix method was also used. Matrix forms of recording the equations of motion of the torsional-oscillatory system of the "MTU" with many degrees of freedom are convenient for calculations to determine the amplitude-frequency characteristics. To calculate the torsional-oscillatory system of the power transmission of a self-propelled chassis aggregated with a cultivator, a dynamic model was developed representing the variational possibilities of analyzing the combination of the factors and parameters under study.

Key words: self-propelled chassis, cultivator, technological corridor, tractor stability, movement on an inclined surface, dynamic model, matrix method

For citation: Tarasova S.V., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Ivanov P.A., Neifeld E.V., Rotova V.A. A method for calculating the frequencies and forms of natural vibrations of a 14-mass torsion-oscillating system of a mobile power tool with a tool when performing technological operations on a slope. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 138–143 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-138-143>

Введение/Introduction

Устойчивое движение мобильных энергетических средств в условиях склонного земледелия играет значительную роль в повышении его функциональных и эксплуатационных характеристик, которые являются основными факторами, способствующими уменьшению энергозатрат. В свою очередь, энергозатраты напрямую зависят от уровня модернизации конструкции сельскохозяйственных тракторов, работающих в нестабильных агроландшафтных условиях. Надо отметить, что улучшение требуемых свойств и эргономических показателей машинно-тракторного агрегата (МТА) характеризуются качеством работы силовой передачи, а также взаимодействием связанных с ней систем [1–5].

Решение проблемы эксплуатации МТА в склонном земледелии, связанной с нарушением им агротехнологических требований при выполнении сельскохозяйственных работ вследствие смещения колесного движителя от траектории движения, возможно за счет оптимизации таких параметров, как собственная частота и форма колебаний. Изучением динамических параметров для технологических систем, а также их элементов занимаются многие ученые. Например, Р.В. Гучинский в своих работах решает вопрос модернизации элементов кузова вагона за счет подбора оптимальных значений жесткости и частот собственных колебаний [6].

С.М. Белинис использовал уравнение Лагранжа второго рода для расчета собственных колебаний при эксплуатации ротора [7]. В работах И.Ф. Кожевникова представлен метод с применением двумерных нестационарных уравнений Навье — Стокса для расчета колебаний цилиндров при их взаимодействии [8, 9]. Большой вклад в исследования собственных частот и форм колебаний вращающейся нагруженной шины внес В. Kim [10].

Цель исследования — изучение влияния собственных частот демпфирования шин на устойчивость движения машинно-тракторного агрегата во время проведения технологических операций на склоне.

Задачи исследования: 1) Разработать метод расчета механических процессов силовой передачи самоходного шасси класса 1.4 трактора «Беларус 952.3» (для 14 элементов распределенной массы) в агрегате с культиватором КРН-5,6. 2) Провести анализ влияния собственных частот и колебаний масс МТА на траекториальную стабилизацию движения посредством расчета коэффициента устойчивости.

Materials and methods /

Материалы и методы исследования

Решая комплексную задачу по улучшению эффективности работы трактора во время

проведения (весенне-полевые работы 2025 г.) агротехнологических операций в ООО «Южный» Акбулакского района Оренбургской области, было принято во внимание то, что новые элементы изменяют всю систему «МТА». Следовательно, на этапе разработки новой или модернизации старой мобильной машины необходимо определить динамические характеристики. Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений законов механики, математики и статистики, базировались на методах теории устойчивости движения машин.

Для проведения математических расчетов вибрационных воздействий силовой передачи машинно-тракторного агрегата была разработана 14-массовая укрупненная расчетная схема для трактора «Беларус 952.3» производителя Минского тракторного завода в агрегате с культиватором КРН-5,6, что позволило создать метод расчета частоты и формы собственных колебаний для МТА.

Трактор в агрегате с навесным орудием в условиях склонного земледелия имеет большое количество свободных колебаний. Изменение спектра частоты собственных колебаний МТА может служить дополнительному износу деталей, шин, скольжению по грунту, отклонению от траектории. При исследовании частотных колебаний трактора «Беларус 952.3» с культиватором КРН-5,6 принят за основу метод, описанный профессором В.А. Лашко¹, а также применен матричный метод [11–14], которые позволили создать динамическую модель из 14 масс (рис. 1), удобную для определения амплитудно-частотных характеристик.

Каждая масса с моментами инерции J в крутильно-колеблющейся системе соединяется связями жесткости C . Допускается отсутствие трения, а колебания имеют небольшие значения.

На основании метода построения собственных и вынужденных колебаний с использованием матриц распределения масс, жесткости и демпфирования² была разработана и адаптирована для системы «трактор — навесное орудие» расчетная процедура, направленная на определение характеристик колебаний машинно-тракторного агрегата. В расчетах были использованы значения моментов инерции и коэффициентов жесткости элементов крутильно-колеблющейся системы согласно данным научных работ авторов (С.Е. Сенькевич, З.А. Годжаев, Е.Н. Ильченко, И.С. Алексеев), пользуясь соотношением² [1].

$$[A] \left\{ \frac{d\ddot{\varphi}}{dt} \right\} + [B] \left\{ \frac{d\dot{\varphi}}{dt} \right\} + [C] \{\varphi\} = \{F\}, \quad (1)$$

где: A — матрица моментов инерции; B — матрица демпфирования; C — матрица крутильной жесткости; F — вектор внешних сил; φ — вектор реакций угловых перемещений; и $\ddot{\varphi}$ — обобщенные

¹ Лашко В.А., Лейбович М.В. Матричные методы в расчетах крутильных колебаний силовых установок с ДВС: учебное пособие. Хабаровск. 2003; 211.

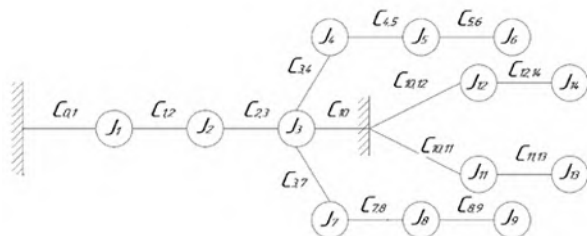
<https://elibrary.ru/qmifzn>

² Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник. Минск: Новое знание. 2013; 584.

Рис. 1. Динамическая схема крутильно-колеблющейся системы «МТА»

Fig. 1. Dynamic diagram of the torsional-oscillating system «MTA»

На рисунке 1 указаны следующие обозначения: J_1 — момент инерции двигателя; J_2 — момент инерции коробки передач (КПП); J_3 — момент инерции главной передачи и дифференциала; J_4, J_7 — моменты инерции бортовых редукторов и дисков колес трактора; J_5, J_8 — моменты инерции шин колес трактора; J_6, J_9, J_{13}, J_{14} — моменты инерции поступательных масс (ПМ); J_{11}, J_{12} — моменты инерции дисков транспортных колес культиватора; J_{12}, J_{13} — моменты инерции шин колес культиватора; $C_{0,1}$ — жесткость участка между двигателями КПП; $C_{2,3}$ — жесткость участка между КПП и главной передачей с дифференциалом; $C_{3,4}$ и $C_{3,7}$ — жесткости участков между главной передачей с дифференциалом и бортовыми редукторами с дисками (правым и левым соответственно); $C_{4,5}$ и $C_{7,8}$ — жесткости участков между бортовыми редукторами с дисками и шинами колес трактора (правым и левым соответственно); $C_{5,6}$ и $C_{8,9}$ — жесткости участков между шинами колес трактора и ПМ; C_{10} — жесткость участка между навесками трактора и культиватора; $C_{10,12}$ и $C_{10,11}$ — жесткости участков между бортовыми редукторами с дисками и шинами транспортных колес культиватора; $C_{12,14}$ и $C_{11,13}$ — жесткости участков между шинами транспортных колес культиватора и ПМ.



координаты и обобщенные ускорения крутильной системы с n степенями свободы соответственно [1, 8].

Для расчета собственных колебаний матрица демпфирования не нужна [1]. Тогда уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$[A] \left\{ \frac{d\ddot{\varphi}}{dt} \right\} + [C] \{\varphi\} = \{F\}, \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений для определения собственных частот 14-массовой системы имеет вид:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C_{1,2} (\varphi_1 - \varphi_2) &= 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - C_{1,2} (\varphi_1 - \varphi_2) + C_{2,3} (\varphi_2 - \varphi_3) &= 0; \\ J_{14} \ddot{\varphi}_{14} - C_{12,13} (\varphi_{12} - \varphi_{13}) + C_{13,14} (\varphi_{13} - \varphi_{14}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно принципу Даламбера $\varphi = a \sin(\omega t + a)$, упругие элементы системы уравниваются величиной $J_i \ddot{\varphi}_i$ и, учитывая зависимость (3), можно рассмотреть систему в матричной форме с фазой колебания "а" и коэффициентом распределения $\mu_i = a_i/a_1, i \in [1, n]$, в виде [8]:

$$([C] - \omega^2[A])\mu = 0 \quad (4)$$

В соответствии с расчетной методикой данная система уравнений рассматривается со значением равным 0, что, как следствие,

приводит к нулевому значению ее определителя $d_{14} = \det([C] - \omega^2[A])\mu = 0$. Таким образом, в результате дальнейших алгебраических преобразований матрица может быть представлена в следующем виде:

$$d_{14} = \begin{vmatrix} C_{1,2} - \omega^2 J_1 & -C_1 & 0 & 0 & 0 \\ -C_1 & C_1 + C_2 - \omega^2 J_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -C_{13} & C_{13} - \omega^2 J_{14} \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

Надо отметить, что определитель d_{14} и минор M_m выглядят идентично. В соответствии со структурой определителя получается рекуррентная формула:

$$d_{14} = \sum_{i=14}^0 (-1)^i \cdot I_i \cdot \omega^{2i} = 0. \quad (6)$$

где I_i — коэффициенты разложения определителя, соответствующие i -й степени квадрата круговой частоты ω^2 .

Для расчета определителя матрицы, которая равна сумме произведений миноров, использовали формулу Лапласа:

$$I_k = \sum_{n=1}^m A_{n,k} \cdot C_{n,n-k}^/, k = n-1, n-2, \dots, 1 \quad (7)$$

где $m = k/n$ — число сочетаний из n по k .

Коэффициент I_0 считается как детерминант матрицы $[C]$, то есть $I_0 = \det(C)$.

Для примера: коэффициент I_{14-2} будет выглядеть:

$$I_{14-2} = \sum_{n=1}^m A_{14,12} \cdot C_{14,2}^/, \quad (8)$$

где $m = \frac{k-2}{n} = \frac{14-2}{14}$ — число сочетаний из $n = 14$ по $k = 14-2$.

Метод Крамера позволил определить с помощью круговых частот ω_i^2 коэффициенты распределения μ_i по матрице (5) [1]:

$$\mu_i = \frac{s}{M_m}. \quad (9)$$

Фактически коэффициенты распределения круговых частот, являясь теоретическим показателем, в практическом плане могут рассматриваться как установочный критерий при монтаже агрегатной системы с учетом конструктивных и режимных параметров, что является предпосылкой к созданию экспериментальных способов валидации на основе заданных пределов технологической погрешности (в данном случае пределов увода от технологической траектории на величину не более 0,3 м).

Получив матрицы коэффициентов распределения для каждого корня ω , из системы (3) можно

вывести уравнения для обобщенной координаты q_i i -й степени свободы системы:

$$q_i = \sum_{i=1}^{n=13} a_i \sin(\omega_i t + e_i), \quad (10)$$

где: a_i — амплитуда колебаний i -й массы; e_i — фазовый угол; ω_i — частота собственных колебаний системы.

Уравнение для φ для 14-массовой системы примет вид [1]:

$$\varphi_i = \sum_{i=1}^{13} a_i \cdot e^{-\gamma \cdot t} \cdot \cos((\sqrt{\omega_i^2 - \gamma_i}) \cdot t), \quad (11)$$

где: γ — конструкционный угол между направляющими движения основного вала и i -вала [8]; e — основание натурального логарифма.

Определитель для 14-массовой системы имеет вид [1]:

$$d_n = J_{14} \cdot (\omega^2)^{14} - J_{13} \cdot (\omega^2)^{13} + J_{12} \cdot (\omega^2)^{12} - J_{11} \cdot (\omega^2)^{11} + J_{10} \cdot (\omega^2)^{10} - J_9 \cdot (\omega^2)^9 + J_8 \cdot (\omega^2)^8 - J_7 \cdot (\omega^2)^7 + J_6 \cdot (\omega^2)^6 - J_5 \cdot (\omega^2)^5 + J_4 \cdot (\omega^2)^4 - J_3 \cdot (\omega^2)^3 + J_2 \cdot (\omega^2)^2 - J_1 \cdot \omega^2 + J_0. \quad (12)$$

Коэффициенты уравнения (7) рассчитываются как [1]:

$$I_{14} = |A| = I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot I_4 \cdot I_5 \cdot I_6 \cdot I_7 \cdot I_8 \cdot I_9 \cdot I_{10} \cdot I_{11} \cdot I_{12} \cdot I_{13}. \quad (13)$$

Общий вид для остальных коэффициентов можно записать в следующем виде:

$$J_i = \sum_{i=1}^{14} A_{14,i} \cdot C'_{i,14-i}, \quad (14)$$

$$J_0 = |C|. \quad (15)$$

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Исходя из проведенных математических преобразований, разработан метод расчета механических процессов силовой передачи к движителю трактора класса 1.4 «Беларус 952.3» (для 14 элементов распределенной массы) в агрегате с культиватором КРН-5,6, интегрирующий сущность методического подхода к построению спектра частот собственных и вынужденных колебаний, а также оценки влияния их на проявление форм этих колебаний с использованием матриц распределения масс, жесткости и коэффициента демпфирования.

Создание теоретических предпосылок влияния собственных частот и колебаний масс МТА на траекториальную стабилизацию движения требует расчета коэффициента устойчивости. При такой постановке вопроса траекторию движения трактора можно рассматривать как кривую, близкую по виду к синусоиде, что позволило бы определить критические значения отклонений, в том числе и от вибрационного воздействия, на установленном участке пути. Анализ процесса отклонения от траектории движения трактора в междурядьях

определяется значениями коэффициента устойчивости движения [4]:

$$K_{yD} = 1 - \sqrt{\frac{B_{CB} - v_T \cdot t_B \cdot \sin \frac{v_T \cdot t_B}{R_{пов}}}{v_T \cdot (t_0 + t_B) \cdot \sin \frac{v_T \cdot t_B}{R_{пов}} - B_{CB}}}, \quad (16)$$

где: $R_{пов}$ — радиус поворота, м; v_T — скорость движения трактора, м/с; B_{CB} — ширина свободной зоны в междурядьях, м; t_0 , t_B — время отклонения и выравнивания траектории трактора на участке длиной S , с.

Однако следует принимать во внимание, что устойчивость движения МТА в заданном направлении находится в прямой зависимости от момента увода вверх (момент заброса $M_{забр.}^{MTA}$), который противоположен моменту сопротивления M_f^{MTA} :

$$M_f^{MTA} = M_{забр.}^{MTA} = G \cdot \sin \alpha \cdot a + (1 - \lambda_{з.к}) \cdot Y'_{з.к} \cdot \frac{B_{тр}}{2} + (1 - \lambda_{п.к}) \cdot Y'_{п.к} \cdot \frac{B_{тр}}{2} + (1 + \lambda_{ор}) \cdot Y'_{ор} \cdot \left(\frac{B_{ор} + B_{тр}}{4} \right) - (\lambda_{ор} - 1) \cdot Y'_{ор} \cdot \left(\frac{B_{ор} - B_{тр}}{24} \right) + P_{кр} \cdot a, \quad (17)$$

где λ — коэффициенты перераспределения веса по колесам трактора и навесного орудия определяются зависимостями

$$\lambda_{з.к} = \frac{Y''_{з.к}}{Y'_{з.к}}, \lambda_{п.к} = \frac{Y''_{п.к}}{Y'_{п.к}}, \lambda_{ор} = \frac{Y''_{ор}}{Y'_{ор}}.$$

При расчетах определения координат центра заброса МТА были приняты следующие допущения, которые не приводят к значительным погрешностям: сопротивлением воздуха пренебрегаем вследствие малости рабочих скоростей МТА во время выполнения технологических операций; углы увода колес орудия и задних колес трактора одинаковы и равны некоторому среднему углу увода эквивалентного колеса.

С целью учесть в модели экстремальный режим работы МТА рассматривали координаты точек пересечения осей эквивалентных колес с плоскостью симметрии «МЭС» и поперечное отклонение центра масс, свидетельствующих о возмущении курсового движения машинно-тракторного агрегата.

Расчет проводили для трактора «Беларус 952.3» в агрегате с культиватором КРН-5,6 при следующих параметрах: скорость МТА 8 км/ч (2,2 м/с), участок длиной 50 м, время отклонения и выравнивания траектории 22 с, ширина свободной зоны 0,3 м.

Анализ массива значений коэффициента устойчивости движения МТА показал, что значения имеют положительный знак и стремятся к 1. Это говорит о том, что машинно-тракторный агрегат в условиях склонного земледелия находится в пределах технологического коридора, не выходит за пределы защитной зоны при условии, что для трактора «Беларус 952.3», укомплектованного шинами на передних колесах 360/70R24 и задних

Таблица 1. Расчет коэффициента устойчивости движения МТА на склоне

Table 1. Calculation of the coefficient of stability of the MT movement on the slope

Параметры	Углы склона, °			
	5	10	15	20
Радиус увода МТА, $R_{ув}$, км	1,895	1,010	0,652	0,4106
Коэффициент устойчивости	0,9442	0,9395	0,9290	0,9259

колесах 18.4R34 Ф-11, установлено давление воздуха на передних колесах МПа, на задних колесах МПа на склоне, на склоне — на передних колесах МПа, на задних колесах МПа; на склоне внутришинное давление в передних колесах МПа, в задних колесах МПа.

Выводы/Conclusions

На основании разработанного метода расчета частот и форм собственных колебаний 14-массовой крутильно-колебательной системы машинно-тракторного агрегата был исследован механический процесс силовой передачи

к движителю тракторов класса 1.4 и установлен спектр частот собственных и вынужденных колебаний, влияющих на проявление их форм с распределением масс, жесткости и коэффициента демпфирования. Для моделей тракторов указанного класса в агрегате с навесным орудием в заданных технологических интервалах (угол увода шин — [1; 15°], угол склона — [5; 20°], давление в шинах — [0,08; 0,2 МПа], коэффициент сцепления с почвой — [0,4; 0,9], масса машины — [1000; 4000 кг], мощность двигателя — [24; 95 л. с.]) коэффициент устойчивости движения составил 0,9442, 0,9395, 0,9290, 0,9259, соответственно, для склонов в 5°, 10°, 15°, 20°. В аспекте оценки процесса стабилизации траекториального движения машинно-тракторного агрегата на склоне это говорит о возможности повышения эффективности их эксплуатации на базе 14-массовых крутильно-колебательных систем во время выполнения технологических операций в реальных производственных условиях для коридора движения с погрешностью отклонения в пределах 10%.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования, выполнены в рамках программы научных исследований по теме «Разработка высокоэффективных зональных машинных технологий и оборудования нового поколения для производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции растениеводства» в соответствии с приказом Минсельхоза РФ от 25.06.2007 № 342 «О концепции развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года» и с темой научных исследований ФГБОУ ВО «Оренбургский ГАУ» № 01201465495 «Методы и технологическая реализация экспериментальных исследований сельскохозяйственной техники».

FUNDING

The research was carried out as part of the research program on the topic "Development of highly efficient zonal machine technologies and new generation equipment for the production of competitive agricultural crop production" in accordance with the Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated 06/25/2007 No. 342 "On the concept of agricultural development science and scientific support of the Russian agro-industrial complex until 2025" and with the topic of scientific research of the Orenburg State Agrarian University No. 01201465495 "Methods and technological implementation of experimental research on agricultural machinery".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сенькевич С.Е., Годжаев З.А., Ильченко Е.Н., Алексеев И.С. Определение частот и форм собственных крутильных колебаний многомассовой системы самоходного шасси тягового класса 0,6. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024; (4): 387–419. <https://www.elibrary.ru/ifymfr>
2. Фасхутдинов М.Х., Зиганшин Б.Г., Галиев И.Г., Мухаметшин А.А. Динамика маневренности трактора с полугусеничным движителем в составе машинно-тракторного агрегата. *Вестник НГИЭИ*. 2020; (10): 43–52. <https://www.elibrary.ru/koonrh>
3. Tarasova S., Asmankin E., Ushakov Yu., Ivanov P., Neifeld E., Rotova V. Methodological foundations of directional stability of a machine-tractor unit in sloping agriculture. *BIO Web of Conferences*. 2024; 130: 02005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413002005>
4. Тарасова С.В. Обоснование способа курсовой стабилизации колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Оренбург. 2015; 158. <https://www.elibrary.ru/dmgexy>
5. Казаков Ю.Ф., Медведев В.И., Павлов В.С., Пыркин А.В. Пути снижения детерминизма скоростей в почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатах. *Аграрная наука*. 2022; (6): 104–111. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-104-111>
6. Гучинский Р.В. Оптимизация конструкции кузова вагона электропоезда по значению частоты собственных колебаний. *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2021; 80(3): 152–159. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-152-159>

REFERENCES

1. Senkevich S.E., Gojaev Z.A., Ilchenko E.N., Alekseev I.S. Determination of frequencies and shapes of natural torsional oscillations of a multimass system of a self-propelled chassis of traction class 0.6. *Proceedings of Nizhnevolskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2024; (4): 387–419 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ifymfr>
2. Faskhutdinov M.H., Ziganshin B.G., Galiev I.G., Muhametshin A.A. Dynamics of maneuverability of the tractor with a half-tracked stroke in the composition of machine-tractor unit. *Bulletin NGIEI*. 2020; (10): 43–52 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/koonrh>
3. Tarasova S., Asmankin E., Ushakov Yu., Ivanov P., Neifeld E., Rotova V. Methodological foundations of directional stability of a machine-tractor unit in sloping agriculture. *BIO Web of Conferences*. 2024; 130: 02005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413002005>
4. Tarasova S.V. Substantiation of the method of course stabilization of a wheeled tractor when performing agricultural operations on an inclined support surface. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Orenburg. 2015; 158 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/dmgexy>
5. Kazakov Yu.F., Medvedev V.I., Pavlov V.S., Pyrkin A.V. Ways to reduce the determinism of speeds in tillage machine-tractor units. *Agrarian science*. 2022; (6): 104–111 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-104-111>
6. Guchinsky R.V. Optimization of an EMU train carbody by the value of the natural bending frequency. *Russian Railway Science Journal*. 2021; 80(3): 152–159 (in Russian). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-152-159>

7. Белинис С.М. Определение собственных частот колебаний ротора. *Вестник Димитровградского инженерно-технологического института*. 2017; (1): 88–92. <https://elibrary.ru/ysroqf>

8. Кожевников И.Ф. Собственные частоты и собственные формы колебаний нагруженной вращающейся шины. *Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)*. 2017; 9(3): 29–35. <https://elibrary.ru/nueskj>

9. Кожевников И.Ф. Вынужденные колебания нагруженной вращающейся шины. *XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. Сборник научных трудов*. М.: ИПУ РАН. 2024; 686–690. <https://elibrary.ru/gzuoie>

10. Kim B.S., Chi C.H., Lee T.K. A study on radial directional natural frequency and damping ratio in a vehicle tire. *Applied Acoustics*. 2007; 68(5): 538–556. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.07.009>

11. Miroshnichenko I., Parinov I. Determination of the Stress-Strain State in Plane-Layered Constructions Made of Transverse-Isotropic Materials with Various Options for the Location of the Axis of Material Symmetry of the Materials of Layers. Parinov I.A., Chang S.-H., Soloviev A.N. (eds.). *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Proceedings of the International Conference PHENMA 2021-2022*. Cham: Springer. 2023; 380–390. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21572-8_31

12. Арефин Ю.В., Ларин А.Н., Субочев А.И. Моделирование собственных колебаний шины на основе плоской профильной модели. *Наукові нотатки*. 2010; 28: 28–31. <https://elibrary.ru/pykrnx>

13. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Математическое моделирование функционирования почвообрабатывающего машинно-тракторного агрегата. *Тракторы и сельхозмашины*. 2018; 85(4): 55–62. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66405>

14. Bulgakov V., Ivanovs S., Nadykto V., Kuvachov V., Masalabov V. Research on the turning ability of a two-machine aggregate. *INMATEH — Agricultural Engineering*. 2018; 54(1): 139–146. <https://elibrary.ru/yblkep>

7. Belinis S.M. Determination of natural frequencies of oscillation of the rotor. *Bulletin of the Dimitrovgrad Engineering and Technology Institute*. 2017; (1): 88–92 (in Russian). <https://elibrary.ru/ysroqf>

8. Kozhevnikov I.F. Natural frequencies and natural forms of vibrations of a loaded rotating tire. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*. 2017; 9(3): 29–35 (in Russian). <https://elibrary.ru/nueskj>

9. Kozhevnikov I.F. Forced vibrations of a loaded rotating tire. *XIV All-Russian Conference on Management Problems. Collection of Scientific papers*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of sciences. 2024; 686–690 (in Russian). <https://elibrary.ru/gzuoie>

10. Kim B.S., Chi C.H., Lee T.K. A study on radial directional natural frequency and damping ratio in a vehicle tire. *Applied Acoustics*. 2007; 68(5): 538–556. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.07.009>

11. Miroshnichenko I., Parinov I. Determination of the Stress-Strain State in Plane-Layered Constructions Made of Transverse-Isotropic Materials with Various Options for the Location of the Axis of Material Symmetry of the Materials of Layers. Parinov I.A., Chang S.-H., Soloviev A.N. (eds.). *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Proceedings of the International Conference PHENMA 2021-2022*. Cham: Springer. 2023; 380–390. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21572-8_31

12. Arefin Yu.V., Larin A.N., Subochev A.I. Modeling of natural tire vibrations based on a flat profile model. *Naukovi notatki*. 2010; 28: 28–31 (in Russian). <https://elibrary.ru/pykrnx>

13. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Mathematical modeling of functioning of a tillage machine-tractor unit. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018; 85(4): 55–62 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66405>

14. Bulgakov V., Ivanovs S., Nadykto V., Kuvachov V., Masalabov V. Research on the turning ability of a two-machine aggregate. *INMATEH — Agricultural Engineering*. 2018; 54(1): 139–146. <https://elibrary.ru/yblkep>

ОБ АВТОРАХ

Сария Вaleyевна Тарасова

кандидат технических наук, доцент
saria20@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8347-2534>

Евгений Михайлович Асманкин

доктор технических наук, профессор
aem500@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7168-0099>

Юрий Андреевич Ушаков

доктор технических наук, профессор
1u6j1a159@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7383-5442>

Павел Александрович Иванов

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
stprepodivanoff@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4505-7428>

Елена Викторовна Нейфельд

кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики и математики
ebneif1978@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-8590-2852>

Виктория Анзорьевна Ротова

кандидат технических наук, доцент
rotova_va@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7862-7829>

Оренбургский государственный аграрный университет,
ул. Челюскинцев, 18, Оренбург, 460014, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Saria Valeyevna Tarasova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
saria20@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-8347-2534>

Evgeny Mikhailovich Asmankin

Doctor of Technical Sciences, Professor
aem500@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7168-0099>

Yuriy Andreevich Ushakov

Doctor of Technical Sciences, Professor
1u6j1a159@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7383-5442>

Pavel Alexandrovich Ivanov

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
stprepodivanoff@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4505-7428>

Elena Victorovna Neifeld

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
of the Department of Physics and Mathematics
ebneif1978@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-8590-2852>

Victoria Anzoryevna Rotova

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor
rotova_va@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7862-7829>

Orenburg State Agrarian University,
18 Chelyuskintsev Str., Orenburg, 460014, Russia

П. Н. Кузнецов^{1, 2}В. П. Евстигнеев²Д. Ю. Котельников^{1, 2} ✉Д. Ю. Воронин¹

¹Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Ялта, Россия

²Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

✉ DYKotelnikov@ya.ru

Поступила в редакцию: 11.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Кузнецов П.Н., Евстигнеев В.П.,
Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю.

Pavel N. Kuznetsov^{1, 2}Vladislav P. Evstigneev²Dmitry Yu. Kotelnikov^{1, 2} ✉Dmitry Yu. Voronin¹

¹All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of the Nationale Research Center "Kurchatov Institute", Yalta, Russia

²Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

✉ DYKotelnikov@ya.ru

Received by the editorial office: 11.07.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Kuznetsov P.N., Evstigneev V.P.,
Kotelnikov D.Yu., Voronin D.Yu.

Разработка и валидация алгоритма коррекции температурных измерений в условиях интенсивной инсоляции

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Точное измерение температуры воздуха является фундаментальной задачей микроклиматического мониторинга виноградников, поскольку этот параметр непосредственно влияет на фенологические процессы, развитие патогенов и формирование качественных характеристик винограда. Доступные метеорологические станции обладают существенным недостатком — значительными систематическими погрешностями при измерении температуры в условиях интенсивной инсоляции. Разработка методов минимизации этих погрешностей критически важна для развития технологий точного виноградарства.

Методы. Исследование основано на теоретическом анализе и экспериментальной валидации теплофизических процессов в радиационных экранах. Разработан специализированный измерительный стенд с метеорологическими комплексами: вентилируемым экраном с фотоэлектрическим питанием и невентилируемым экраном, оснащенными датчиками скорости ветра и солнечной радиации. Предложена оригинальная физическая модель теплового баланса, учитывающая конвективный теплообмен, радиационное воздействие и геометрические характеристики защитных устройств. Разработан адаптивный итерационный алгоритм для вычисления температурных поправок в реальном времени на микроконтроллерных системах с механизмами обработки сингулярных состояний и обеспечением устойчивой конвергенции.

Результаты. Экспериментально подтверждено, что невентилируемые экраны демонстрируют систематические погрешности до 3 °C при высокой инсоляции. Вентилируемые экраны снижают максимальные отклонения до 1 °C, но требуют регулярного обслуживания. Разработанный алгоритм математической коррекции превосходит оба альтернативных решения: максимальные отклонения не превышают 0,6 °C, средние отклонения составляют 0,2 °C, нормализованная среднеквадратическая ошибка составляет 3,5%, критерий Клинга — Гупты достигает 0,993. Предложенное решение обеспечивает оптимальный баланс точности, экономичности и надежности для создания доступных плотных сетей микроклиматического мониторинга виноградников.

Ключевые слова: температура воздуха, погрешность радиационного экрана, корректировка измерений, солнечная радиация, мониторинг в реальном времени, виноградарство

Для цитирования: Кузнецов П.Н., Евстигнеев В.П., Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю. Разработка и валидация алгоритма коррекции температурных измерений в условиях интенсивной инсоляции. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 144–158.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-144-158>

Development and validation of a temperature measurement correction algorithm under intensive solar radiation conditions

ABSTRACT

Relevance. Accurate air temperature measurement is a fundamental task in vineyard microclimate monitoring, as this parameter directly affects phenological processes, pathogen development, and the formation of grape quality characteristics. Available meteorological stations possess a significant limitation — substantial systematic errors when measuring temperature under conditions of intense solar radiation. The development of methods to minimize these errors is critically important for advancing precision viticulture technologies.

Methods. The study is based on theoretical analysis and experimental validation of thermophysical processes in radiation shields. A specialized measurement setup was developed with meteorological systems: a ventilated shield with photovoltaic power supply and a non-ventilated shield, equipped with wind speed and solar radiation sensors. An original physical model of heat balance was proposed, accounting for convective heat exchange, radiative effects, and geometric characteristics of protective devices. An adaptive iterative algorithm was developed for real-time temperature correction calculations on microcontroller systems with mechanisms for handling singular states and ensuring stable convergence.

Results. It was experimentally confirmed that non-ventilated shields demonstrate systematic errors up to 3 °C under high solar radiation. Ventilated shields reduce maximum deviations to 1 °C but require regular maintenance. The developed mathematical correction algorithm outperforms both alternative solutions: maximum deviations do not exceed 0.6 °C, mean deviations are 0.2 °C, normalized root-mean-square error is 3.5%, and the Kling — Gupta criterion reaches 0.993. The proposed solution provides an optimal balance of accuracy, cost-effectiveness, and reliability for creating affordable dense networks for vineyard microclimate monitoring.

Key words: air temperature, radiation screen error, measurement correction, solar radiation, real-time monitoring, viticulture

For citation: Kuznetsov P.N., Evstigneev V.P., Kotelnikov D.Yu., Voronin D.Yu. Development and validation of a temperature measurement correction algorithm under intensive solar radiation conditions. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 144–158 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-144-158>

Введение/Introduction

Виноградарство характеризуется высокой зависимостью качества и количества урожая от метеорологических условий [1]. Для получения высоких урожаев необходим контроль температуры, влажности воздуха и почвы, количества осадков, интенсивности солнечной радиации и влажности листьев [2, 3]. Автоматические метеостанции являются эффективным инструментом мониторинга агроклиматических условий [4, 5], обеспечивая точные данные о микроклиматическом состоянии виноградника для прогнозирования.

На основе метеорологических данных виноградары планируют агротехнические мероприятия [6], оптимизируют режимы полива и внесения удобрений [7, 8], предотвращают развитие болезней и вредителей [9–13]. Мониторинг позволяет определить сумму активных температур в течение вегетационного периода, оценить содержание сахара в урожае и прогнозировать оптимальные сроки сбора [14, 15]. Применение метеостанций повышает точность агрономических мероприятий, снижает риски потерь и способствует выращиванию высококачественного винограда [16, 17].

Существующие сети мониторинга, основанные на дорогостоящих профессиональных метеостанциях, не обеспечивают необходимую пространственную детализацию данных для эффективного управления отдельными участками виноградника. Решением данной проблемы является разработка распределенных сетей автономных метеосистем на базе технологий интернета вещей (IoT), обеспечивающих локальный мониторинг микроклиматических условий непосредственно в зонах выращивания. Такие системы характеризуются значительно более низкой стоимостью по сравнению с профессиональным оборудованием, простотой развертывания и возможностью создания плотных сетей датчиков для детального картирования микроклиматических условий виноградника [18, 19].

Однако практическая реализация IoT-систем мониторинга сталкивается с фундаментальной проблемой обеспечения достаточной точности измерений при использовании недорогих датчиков. Неточные данные не только снижают эффективность агротехнических решений, но и могут привести к ошибочным выводам о состоянии виноградника. Наиболее критичным является измерение температуры воздуха — ключевого параметра для большинства агрометеорологических расчетов, точность которого существенно снижается под воздействием солнечной радиации, вызывающей дополнительный нагрев радиационного экрана [20, 21].

Экспериментальные исследования подтверждают существенную величину радиационных

погрешностей: бюджетные радиационные экраны характеризуются отклонениями до нескольких градусов при воздействии интенсивной солнечной радиации [22–25], в то время как дорогостоящие коммерческие устройства демонстрируют лишь частичную компенсацию радиационных ошибок [23, 26].

Обзор литературы показал два основных направления повышения точности — использование вентилируемых радиационных экранов и корректировку измерений на основе данных о солнечной радиации и других факторах [22, 23, 27–30].

Вентилируемые экраны создают интенсивный воздушный поток (2–5 м/с) вокруг датчика, выравнивая температуру внутри экрана с температурой окружающего воздуха и снижая влияние собственного инфракрасного излучения датчика [28, 31]. Это техническое решение делает работу датчика практически независимой от погодных условий.

Корректировка измерений основана на математических моделях теплового баланса, учитывающих конструктивные особенности экрана. Модели позволяют рассчитать величину отклонения из-за радиационного теплообмена на основе измеренных значений солнечной радиации и скорости ветра, обеспечивая коррекцию показаний датчика [23, 26, 32–36].

Цель настоящего исследования — комплексная оценка эффективности методов повышения точности измерений температуры воздуха при использовании доступных метеорологических устройств для создания пространственно-распределенных сетей микроклиматического мониторинга виноградников.

Исследование включало сравнительный анализ погрешностей измерения температуры воздуха метеорологическими комплексами с вентилируемыми и невентилируемыми радиационными экранами, а также экспериментальную валидацию разработанного адаптивного алгоритма математической коррекции показаний на основе учета сопутствующих метеорологических параметров для определения оптимального подхода к созданию экономически эффективных систем мониторинга.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Экспериментальная база и условия проведения исследований

Экспериментальные исследования проводили на территории метеорологической станции (МГ «Севастополь»), расположенной на мысе Павловский (44°37'01.0" с. ш., 33°31'56.3" в. д.). Выбор данной локации обусловлен наличием стандартизированной метеорологической площадки, оборудованной в соответствии с требованиями Всемирной метеорологической организации¹, что обеспечивает репрезентативность получаемых данных.

¹ World Meteorological Organization Provisional 2023 edition of the Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8) / World Meteorological Organization. 2023.

Измерения выполняли в летний период — с 1 июня по 31 августа 2023 года, характеризующийся максимальными значениями солнечной радиации (до 1200 Вт/м²) и высокими температурами воздуха (до 35 °С), что позволяет охватить весь спектр метеорологических условий, критичных для оценки погрешностей радиационных экранов.

Метод принудительной вентиляции радиационного экрана

Первый исследуемый метод основан на применении принудительной вентиляции радиационного экрана с целью минимизации влияния солнечной радиации на точность измерения температуры воздуха. Принудительная вентиляция обеспечивается установкой электрического вентилятора в конструкции радиационного экрана, что создает интенсивный воздушный поток через датчик температуры со скоростью 2–5 м/с [28, 31]. Данный подход позволяет значительно снизить радиационную погрешность, особенно в условиях интенсивной солнечной радиации и слабого естественного ветра, поскольку создаваемый воздушный поток выравнивает температуру внутри защитного экрана с температурой окружающего воздуха.

В конструкции исследуемого вентилируемого радиационного экрана использовали осевой вентилятор диаметром 50 мм с номинальной мощностью 1 Вт. Отличительная особенность реализованного технического решения — питание вентилятора от автономного фотоэлектрического преобразователя мощностью 5 Вт, что обеспечивало адаптивную регулировку интенсивности воздушного потока в зависимости от уровня солнечной радиации.

При максимальной инсоляции скорость воздушного потока внутри экрана достигала 3–4 м/с, что соответствует рекомендациям для аспирационных систем. Такая конфигурация имеет значительные преимущества с точки зрения автономности и способности автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, поскольку интенсивность циркуляции воздуха внутри радиационного экрана напрямую зависит от электрической мощности, генерируемой фотоэлектрическими преобразователями, которая непосредственно связана с интенсивностью солнечной радиации.

Метод математической коррекции температурных измерений

Второй исследуемый метод основан на применении математической коррекции показаний невентилируемого радиационного экрана посредством вычисления температурной поправки на основе уравнения теплового баланса. Данный подход предполагает использование физической модели, учитывающей интенсивность солнечной радиации, скорость ветрового потока и геометрические характеристики защитного устройства для компенсации систематических ошибок в режиме реального времени [23, 26, 29, 32, 33].

Теоретическая основа метода коррекции базируется на фундаментальном принципе теплового баланса, согласно которому в стационарном состоянии количество тепла, поступающего в радиационный экран, равно количеству тепла, отводимого от радиационного экрана, что математически выражается уравнением:

$$Q_{in} - Q_{out} = 0, \quad (1)$$

где: Q_{in} — количество тепла, поступающего в радиационный экран, Дж; Q_{out} — количество тепла, отводимого от радиационного экрана, Дж.

Количество тепла, поступающего в радиационный экран, определяется интенсивностью солнечной радиации, альбедо поверхности и площадью экспозиции согласно уравнению:

$$Q_{in} = (1-A) \cdot IS \cdot F_1 \cdot \tau, \quad (2)$$

где: A — альбедо поверхности; IS — интенсивность солнечной радиации, Вт·м⁻²; F_1 — площадь поверхности, подверженной солнечной радиации, м²; τ — время, с.

Тепло, отводимое от радиационного экрана, осуществляется посредством конвективного теплообмена и других механизмов теплопередачи. Для упрощения математической модели основное внимание было уделено конвективному теплообмену и теплопроводности как доминирующим механизмам отвода тепла.

Радиационный теплообмен и другие, менее значимые механизмы не моделировались напрямую, вместо этого их совокупное влияние было аппроксимировано с использованием эмпирического коэффициента нелинейности в модифицированном уравнении Ньютона — Рихмана:

$$Q_{out} = (\Delta T \cdot h \cdot F_2 + \varepsilon \cdot F_3) \cdot \tau, \quad (3)$$

где: ΔT — отклонение температуры датчика, К; h — коэффициент теплопередачи от радиационного экрана к окружающей среде, Вт·м⁻²·К⁻¹; F_2 — площадь поверхности, обдуваемая ветром, м²; ε — эмпирический коэффициент нелинейности теплопередачи, Вт·м⁻²; F_3 — общая площадь поверхности, м².

Объединяя уравнения (1), (2) и (3), получаем формулу для отклонения температуры ΔT :

$$\Delta T = \frac{(1-A) \cdot IS \cdot F_1 - \varepsilon \cdot F_3}{h \cdot F_2}. \quad (4)$$

Полный коэффициент теплоотдачи объединяет составляющие вынужденной и свободной конвекции:

$$h = h_w + h_f, \quad (5)$$

где: h_w — коэффициент теплопередачи при вынужденной конвекции, Вт·м⁻²·К⁻¹; h_f — коэффициент теплопередачи при свободной конвекции, Вт·м⁻²·К⁻¹.

Эмпирический коэффициент нелинейности рассчитывается из соответствующего выражения:

$$\varepsilon = k \cdot \left(\frac{IS}{IS_{STC}} \right)^{1.2}, \quad (6)$$

где: k — эмпирический коэффициент тепловой коррекции, Вт·м²; IS_{STC} — интенсивность солнечной радиации при стандартных условиях, 1000 Вт·м² [23].

Коэффициенты теплопередачи для процессов вынужденной и свободной конвекции были выведены на основе классических безразмерных критериев подобия чисел Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа в соответствии с фундаментальными положениями теории теплообмена [37].

Подстановка полученных выражений для коэффициентов вынужденной и свободной конвекции в формулу для температурного отклонения (4) позволяет представить результирующую величину ΔT в виде функциональной зависимости от скорости ветра w и интенсивности солнечной радиации IS , что выражается комплексным аналитическим соотношением:

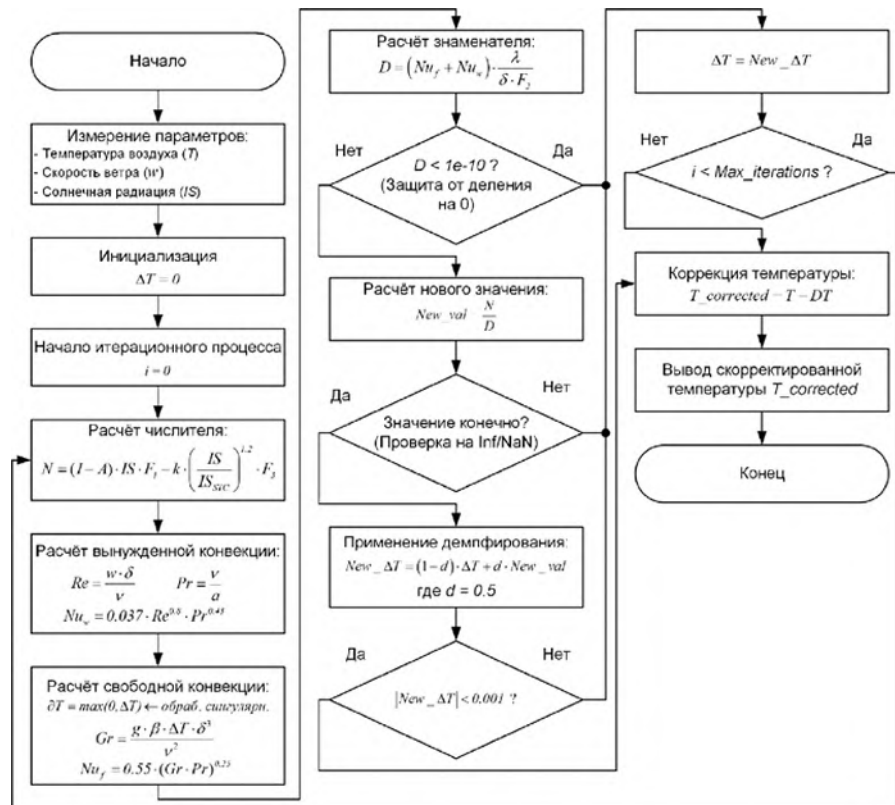
$$\Delta T(w, IS) = \frac{(1-A) \cdot IS \cdot F_1 - k \cdot \left(\frac{IS}{IS_{STC}} \right)^{1.2} \cdot F_3}{((0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} + 0.55 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25}) \cdot \frac{\lambda}{\delta}) \cdot F_2}, \quad (7)$$

где: Re — число Рейнольдса, характеризующее соотношение инерционных и вязкостных сил в потоке, определяемое по уравнению; Pr — число Прандтля, отражающее соотношение между переносом импульса и теплопереносом в среде; Gr — безразмерное число Грасгофа, характеризующее соотношение архимедовых подъемных сил к силам вязкостного трения в условиях свободной конвекции; λ — коэффициент теплопроводности воздуха как теплопередающей среды, Вт·м⁻¹·К⁻¹; δ — характеристический геометрический параметр, соответствующий внешнему диаметру радиационного экрана, м; w — скорость ветра, м·с⁻¹.

Подстановка всех теплофизических параметров воздуха и критериальных соотношений позволяет получить окончательное выражение для температурного отклонения в виде явной функции

Рис. 1. Блок-схема алгоритма итерационного решения уравнения теплового баланса для коррекции температурных измерений в микроконтроллерной системе метеостанции (авторский рисунок)

Fig. 1. Block diagram of the iterative algorithm for solving the thermal balance equation for temperature measurement correction in a microcontroller-based weather station system (author's picture)



$\Delta T(w, IS)$ от скорости ветра и интенсивности солнечной радиации:

$$\Delta T(w, IS) = \frac{\delta}{\lambda \cdot F_2} \cdot \frac{(1-A) \cdot IS \cdot F_1 - k \cdot \left(\frac{IS}{IS_{STC}} \right)^{1.2} \cdot F_3}{0.037 \cdot \left(\frac{w \cdot \delta}{\nu} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)^{0.43} + 0.55 \cdot \left(\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot \delta^3}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{\alpha} \right)^{0.25}}, \quad (8)$$

где: α — коэффициент температуропроводности воздуха, Вт·м⁻¹·К⁻¹; g — ускорение свободного падения, м·с⁻²; β — коэффициент объемного расширения, К⁻¹; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²·с⁻¹.

Алгоритм решения уравнения теплового баланса

Выведенное трансцендентное уравнение (8) не допускает прямого аналитического решения относительно величины ΔT . Для численного решения данного уравнения был применен итерационный метод с фиксированной точкой в сочетании с адаптивной демпфирующей процедурой, обеспечивающей устойчивую сходимость вычислительного процесса. Детальная блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 1, где наглядно отображены все этапы вычислительного процесса, включая механизмы обработки особых случаев и конвергенции итераций.

Представленная блок-схема алгоритма наглядно демонстрирует многоуровневую структуру вычислительного процесса, реализованного в микроконтроллерной системе метеостанции. Алгоритм начинается с инициализации переменных и сбора входных данных: температуры

Рис. 2. Структурная схема экспериментального стенда. Рисунок автора

Fig. 2. Structural diagram of the experimental stand. The author's drawing



окружающего воздуха, скорости ветра и интенсивности солнечной радиации. Центральную часть алгоритма составляет итерационный цикл решения трансцендентного уравнения, включающий последовательное вычисление компонентов числителя и знаменателя согласно физической модели теплообмена.

Особое внимание в схеме уделено механизмам обработки сингулярных состояний: предотвращение извлечения корня из отрицательного значения при расчете числа Грасгофа путем применения ограничивающей функции максимума; защита от деления на 0 при вырождении знаменателя через проверку его абсолютного значения на близость к 0; контроль конечности результата для исключения распространения бесконечных значений. Процесс конвергенции обеспечивается внедрением демпфирующего коэффициента 0,5, который позволяет сглаживать резкие изменения значений между итерациями, предотвращая численные осцилляции.

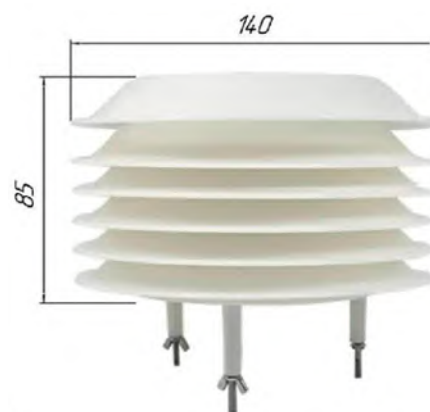
Экспериментальный стенд и измерительное оборудование

Для решения поставленных задач был разработан специализированный экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рисунке 2.

Стенд включал три независимых метеорологических комплекса: исследуемый комплекс с естественной вентиляцией, исследуемый комплекс с принудительной вентиляцией и опорный метеокomплекс на базе стандартного оборудования метеостанции. Все комплексы были подключены к единому веб-серверу для синхронизированного сбора данных с последующей статистической обработкой результатов параллельных измерений. К комплексу с естественной вентиляцией дополнительно был подключен измерительный модуль «Сокол-М1», обеспечивающий регистрацию

Рис. 3. Внешний вид радиационного экрана (фотография из открытых источников сети Интернет)

Fig. 3. External view of the radiation shield (photo from open Internet sources)



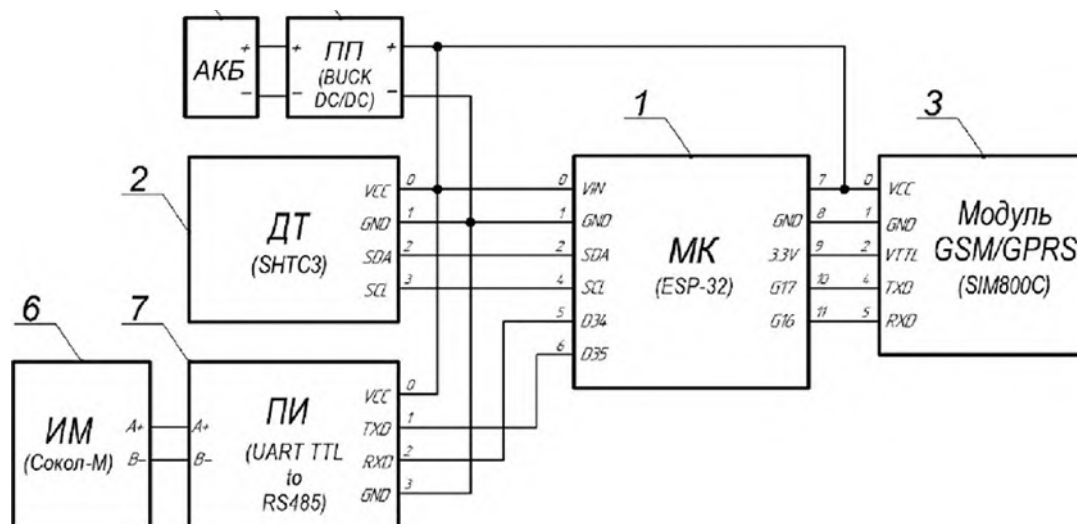
скорости ветра и интенсивности солнечной радиации для реализации алгоритма коррекции.

Исследуемый метеорологический комплекс с принудительной вентиляцией представлял собой автоматизированную измерительную систему, основанную на микроконтроллере ESP32 (WROOM-32) с интегрированным модулем беспроводной передачи данных. Конструктивно комплекс включал радиационный экран из АБС-пластика с внешним диаметром пластин 140 мм и внутренним диаметром 62 мм, обеспечивающий защиту датчика от прямого воздействия солнечной радиации (рис. 3).

Отличительной особенностью данной конфигурации являлось наличие системы принудительной вентиляции, реализованной на основе осевого вентилятора диаметром 50 мм с номинальной мощностью 1 Вт. Питание вентилятора осуществлялось от автономного фотоэлектрического преобразователя мощностью 5 Вт, что обеспечивало адаптивную регулировку интенсивности воздушного потока в зависимости от уровня солнечной

Рис. 4. Функциональная схема метеорологического комплекса (авторский рисунок): 1 — микроконтроллер ESP32 (WROOM-32); 2 — модуль датчика температуры SHTC3; 3 — модуль GSM/GPRS SIM800C; 4 — литий-ионный аккумулятор; 5 — понижающий преобразователь DC/DC; 6 — измерительный модуль «Сокол-М»; 7 — преобразователь интерфейса UART TTL — RS485

Fig. 4. Functional diagram of the meteorological complex (author's picture): 1 — ESP32 microcontroller (WROOM-32); 2 — SHTC3 temperature sensor module; 3 — GSM/GPRS SIM800C module; 4 — lithium-ion battery; 5 — step-down DC/DC converter; 6 — “Sokol-M” measurement module; 7 — UART TTL — RS485 interface converter



радиации. При максимальной инсоляции скорость воздушного потока внутри экрана достигала 3–4 м/с, что соответствует рекомендациям для аспирационных систем [28, 31].

Функциональная схема метеорологического комплекса представлена на рисунке 4. В качестве первичного преобразователя температуры и влажности использовали цифровой датчик SHTC3 с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Выбор данного датчика обусловлен его высокой точностью ($\pm 0,2$ °C), широким диапазоном измерений (от -40 до +125 °C) и низким энергопотреблением, что критично для автономных систем. Передача данных на удаленный сервер осуществлялась посредством GSM/GPRS модуля SIM800C через мобильные сети, обеспечивая надежную связь в условиях удаленного размещения измерительных точек. Питание системы реализовано от литий-ионного аккумулятора емкостью 3000 мА·ч с подзарядкой от солнечной панели, что гарантирует непрерывную работу комплекса в течение всего периода исследования.

Исследуемый метеорологический комплекс с естественной вентиляцией имел идентичную аппаратную конфигурацию, за исключением отсутствия системы принудительной циркуляции воздуха. Данный комплекс использовал аналогичный радиационный экран из АБС-пластика с теми же геометрическими параметрами, что обеспечивало корректность сравнительного анализа. Конвективный теплообмен в данной конфигурации осуществлялся исключительно за счет естественной циркуляции воздуха через вентиляционные отверстия между пластинами экрана. Дополнительно к

Таблица 1. Технические характеристики модуля датчика температуры и влажности SHTC3
Table 1. Technical specifications of the SHTC3 temperature and humidity sensor module

Параметр	Значение
Рабочее напряжение	3,3–5,5 В
Тип подключения	I2C
Диапазон измерения влажности	0–100%
Точность измерения влажности	~ 2%
Диапазон измерения температуры	-40–125 °C
Точность измерения температуры	~ 0,2 °C

базовой конфигурации был подключен измерительный модуль «Сокол-М1»², включающий чашечный анемометр для регистрации скорости ветра и пиранометр PYR20 для измерения интенсивности солнечной радиации. Данные параметры являлись входными для алгоритма математической коррекции температурных показаний.

В качестве опорного метеорологического комплекса использовали стандартное оборудование метеостанции МГ «Севастополь», функционирующее в соответствии с программой наблюдений Росгидромета. Эталонные измерения температуры воздуха выполняли психрометрическим методом с использованием аспирационного психрометра Ассмана, размещенного в стандартной метеорологической будке на высоте 2 м над поверхностью земли. Данная конфигурация полностью соответствует требованиям Всемирной метеорологической организации к размещению стандартных термометров на метеорологической площадке. Психрометрическая будка обеспечивала естественную вентиляцию

² Официальный сайт производителя метеостанции «Сокол-М1» с техническими характеристиками.
<https://sokolmeteo.ru/weather-station/>

и защиту приборов от прямого солнечного излучения, осадков и излучения земной поверхности. Показания эталонного термометра регистрировались автоматизированной системой с дискретностью 1 час, что соответствовало стандартным срокам метеорологических наблюдений. Общий вид экспериментального стенда на метеорологической площадке представлен на рисунке 5.

Методы статистической обработки данных

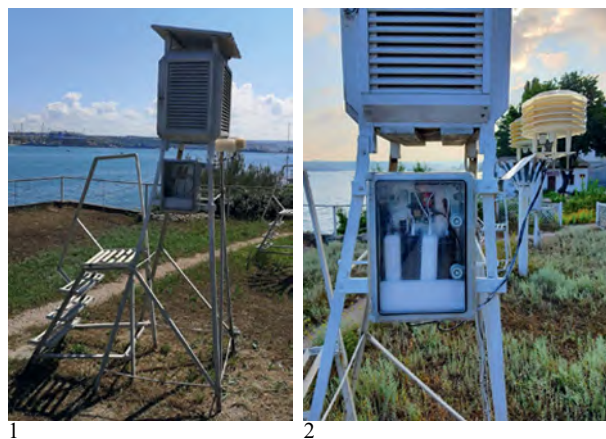
Статистическую обработку результатов измерений осуществляли в несколько этапов для обеспечения достоверности получаемых данных. На первом этапе выполняли фильтрацию первичных измерений для исключения случайных выбросов, обусловленных кратковременными помехами или сбоями в работе датчиков. Алгоритм фильтрации основывался на классическом правиле трех сигм [38], согласно которому значения, отклоняющиеся от среднего более чем на три стандартных отклонения, считаются статистическими выбросами.

Для минимизации влияния ошибки выборки перед фильтрацией накапливалось не менее 50 последовательных измерений каждого параметра. Исследуемые метеорологические комплексы регистрировали данные с высокой частотой дискретизации (одно измерение — каждые 15–20 сек.), что позволяло получать статистически значимые выборки за короткие временные интервалы. После первичной фильтрации данные усреднялись за периоды ± 1 мин. относительно каждого целого часа для получения синхронизированных рядов часовых значений, сопоставимых с эталонными измерениями.

Расчет выборочного стандартного отклонения выполняли по стандартной формуле с поправкой Бесселя [39], обеспечивающей несмещенную оценку дисперсии генеральной совокупности. На втором этапе статистической обработки выполнялся расчет комплекса метрик для количественной оценки отклонений показаний исследуемых датчиков от эталонных значений. Использовался набор из 10 специализированных статистических показателей, включающий среднюю ошибку (ME), среднюю абсолютную ошибку (MAE), среднеквадратическую ошибку (RMSE), нормализованную среднеквадратическую ошибку (NRMSE), систематическое отклонение (PBIAS), отношение стандартных отклонений (rSD), критерий эффективности Нэша — Сатклиффа (NSE) и его модифицированную форму (mNSE), коэффициент персистентности (ср) [40] и критерий эффективности Клингга — Гупты (KGE) [41]. Данный набор метрик обеспечивал всестороннюю оценку точности измерений, учитывая как систематические, так и случайные составляющие погрешности.

Рис. 5. Фотография экспериментального стенда на метеорологической станции МГ «Севастополь»: 1 — общий вид экспериментального стенда с тремя метеорологическими комплексами; 2 — исследуемые метеорологические комплексы с вентилируемым и невентилируемым радиационными экранами. Фото авторов

Fig. 5. Photograph of the experimental stand at the MG Sevastopol meteorological station: 1 — general view of the experimental stand with three meteorological complexes; 2 — meteorological complexes under study with ventilated and non-ventilated radiation screens. Photos of the authors



Результаты и обсуждение / Results and discussion

Комплексное исследование эффективности методов повышения точности измерений температуры воздуха в условиях интенсивной инсоляции было построено на принципе последовательной валидации теоретических предположений экспериментальными данными. Фундаментальной основой исследования служила разработанная физическая модель теплового баланса радиационного экрана, которая учитывала не только интенсивность солнечной радиации и скорость ветрового потока, но и геометрические характеристики защитного устройства. Эта комплексность подхода принципиально отличает предложенное решение от упрощенных методов коррекции, описанных в работах Hubbard и Lin [23], которые не обеспечивают адекватного учета конструктивных особенностей радиационных экранов.

Для практической реализации теоретической модели потребовалось определение специфических численных коэффициентов исследуемого радиационного экрана.

Представленные параметры включали альбедо поверхности 0,8, что соответствует отражательной способности белого АБС-пластика. Каждый из этих параметров был получен либо путем прямых геометрических измерений конструкции радиационного экрана, либо посредством калибровки

Таблица 2. Численные коэффициенты исследуемого радиационного экрана

Table 2. Numerical coefficients of the investigated radiation shield

A	$F_1, \text{ м}^2$	$F_2, \text{ м}^2$	$F_3, \text{ м}^2$	$\delta, \text{ м}$	$k, \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-2}$
0,8	0,015	0,09	0,12	0,14	17,2

по экспериментальным данным, что обеспечивало высокую степень соответствия модели реальным физическим процессам теплообмена.

Результаты численного моделирования демонстрируют сложную нелинейную зависимость температурных отклонений от исследуемых параметров.

Анализ трехмерной поверхности на рисунке 6 позволяет понять физическую природу наблюдаемых закономерностей. При интенсивности солнечной радиации 1000 Вт/м^2 и отсутствии ветрового потока температурное отклонение достигает критического значения ($2,3 \text{ }^\circ\text{C}$), что объясняется доминированием радиационного нагрева над конвективным охлаждением. Увеличение скорости ветра до 5 м/с приводит к резкому снижению отклонения (до $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) благодаря интенсификации конвективного теплообмена. Эта закономерность подтверждает правильность теоретических предпосылок модели и согласуется с фундаментальными принципами теории теплообмена, изложенными в [37].

Разработанный итерационный алгоритм решения трансцендентного уравнения (15) был интегрирован в программно-аппаратный комплекс микроконтроллерной системы ESP32, что обеспечило возможность динамической температурной коррекции в режиме реального времени. Алгоритм продемонстрировал устойчивую сходимость при всех исследованных метеорологических условиях: количество итераций не превышало 15 циклов для достижения заданной точности $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$, а время вычисления одной коррекции составляло менее 50 миллисекунд, что позволяет выполнять расчеты синхронно с частотой измерений датчика.

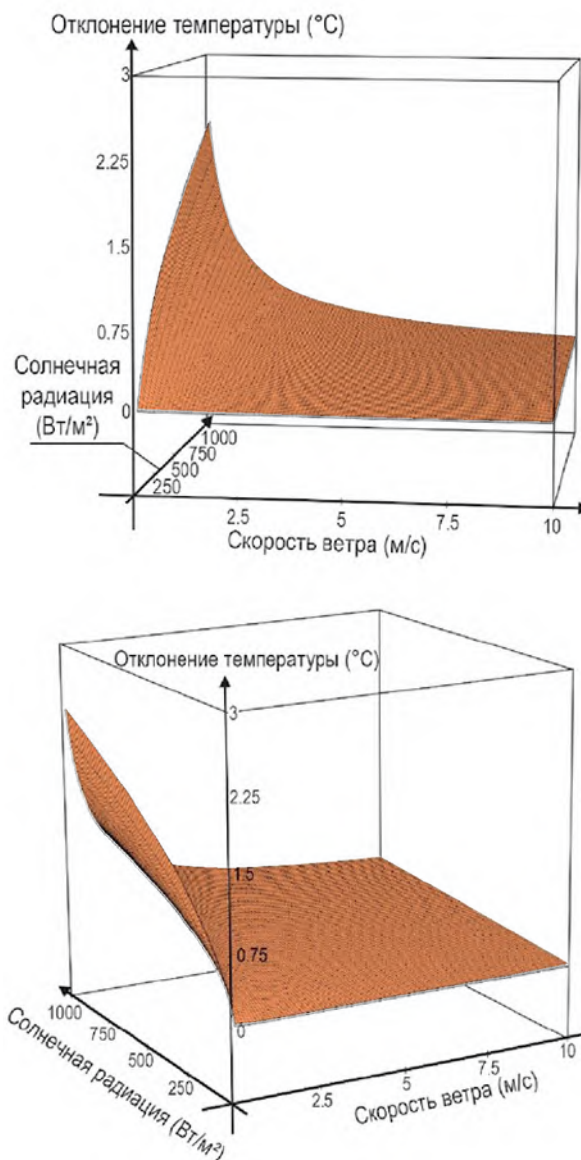
Экспериментальные измерения, проводившиеся на метеорологической станции МГ «Севастополь», позволили накопить представительный массив из более чем 6000 синхронизированных измерений температуры воздуха. Диапазон зарегистрированных условий охватывал интенсивность солнечной радиации от 0 до 1200 Вт/м^2 и скорость ветра от $0,1$ до $8,5 \text{ м/с}$, что включало весь спектр характерных для летнего периода ситуаций, критичных для оценки эффективности методов коррекции радиационных погрешностей.

Сравнительный анализ эффективности трех исследуемых подходов основывался на параллельной регистрации температурных показаний независимыми метеорологическими комплексами с вентилируемым радиационным экраном, невентилируемым экраном и невентилируемым экраном с математической коррекцией. Функции плотности вероятности отклонений относительно эталонных данных демонстрируют принципиальные различия в характере распределений:

Анализ функций плотности вероятности на рисунке 7 позволяет понять фундаментальные

Рис. 6. Зависимость отклонения температуры воздуха от интенсивности солнечной радиации и скорости ветрового потока для исследуемого радиационного экрана

Fig. 6. Dependence of air temperature deviation on solar radiation intensity and wind flow velocity for the investigated radiation shield



различия в поведении трех типов радиационных экранов. Для невентилируемого радиационного экрана характерна выраженная асимметрия распределения с заметным расширением правой части и смещением моды от нулевого значения в положительную сторону. Эта особенность указывает на систематическую природу погрешности, когда датчик стабильно завышает показания температуры вследствие дополнительного нагрева от солнечной радиации. Максимальные отклонения достигают $2 \text{ }^\circ\text{C}$, что создает критические проблемы для точного микроклиматического мониторинга виноградников, поскольку такие погрешности могут привести к ошибочным агротехническим решениям.

Вентилируемый радиационный экран демонстрирует существенно более симметричное распределение отклонений с максимальными значениями до 1 °С, что подтверждает эффективность принудительной циркуляции воздуха для минимизации радиационных погрешностей. Однако наилучшие результаты показывает невентилируемый экран с математической коррекцией: распределение отклонений практически симметрично относительно 0, а максимальные погрешности не превышают 0,5–0,6 °С. Это достижение особенно значимо, поскольку демонстрирует возможность получения высокой точности измерений без использования механических компонентов (вентилятора), что критично для долговременного автономного мониторинга.

Детальный анализ временной динамики погрешностей представлен на тепловой карте почасовых отклонений, которая наглядно демонстрирует связь между интенсивностью солнечной радиации и величиной температурных погрешностей.

Тепловая карта четко показывает, что для невентилируемого радиационного экрана максимальные погрешности концентрируются в дневные часы — с 10 до 14, когда Солнце находится в зените и интенсивность прямой солнечной радиации достигает пиковых значений. Эта закономерность подтверждает доминирующую роль солнечной радиации в формировании систематических погрешностей и согласуется с результатами исследований [29], которые отмечали корреляцию между положением Солнца и величиной температурных отклонений. Применение математической коррекции эффективно устраняет эти характерные пики погрешностей, что визуально подтверждается практически полным отсутствием зон значительных отклонений на соответствующей части тепловой карты.

Количественная оценка эффективности различных подходов была выполнена с использованием комплекса из 10 специализированных статистических метрик, каждая из которых характеризует определенный аспект точности измерений. Выбор именно этого набора метрик обусловлен необходимостью всесторонней оценки как систематических, так и случайных составляющих погрешности, что критически важно для понимания природы отклонений и эффективности методов их коррекции.

Рис. 7. Функция плотности вероятности отклонений температуры воздуха для вентилируемого, невентилируемого и скорректированного радиационных экранов относительно эталонных данных

Fig. 7. Probability density function of air temperature deviations for ventilated, non-ventilated, and corrected radiation shields relative to reference data

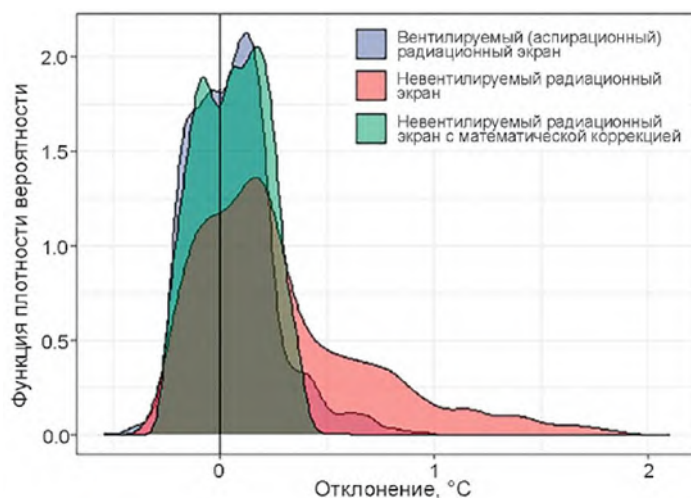


Рис. 8. Тепловая карта отклонений температуры воздуха для трех типов датчиков: вентилируемого, невентилируемого и скорректированного радиационных экранов относительно эталонных данных

Fig. 8. Heat map of air temperature deviations for three types of sensors: ventilated, non-ventilated, and corrected radiation shields relative to reference data

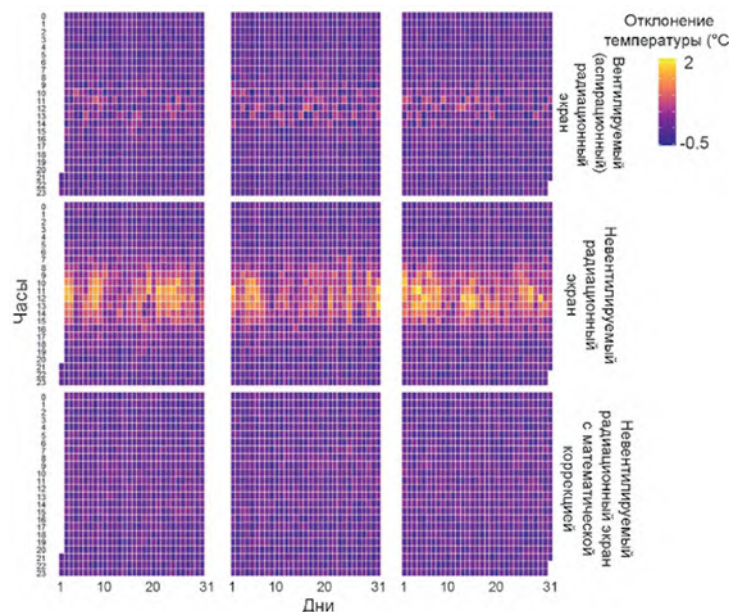


Таблица 3. Метрики отклонений для различных устройств по отношению к эталонным данным

Table 3. Deviation metrics for various devices relative to reference data

№	Метрика	Вентилируе- мый экран	Невентилиру- емый экран	Скорректированный невентилируемый экран
1	ME	0,06	0,29	0,06
2	MAE	0,16	0,35	0,14
3	RMSE	0,21	0,51	0,17
4	NRMSE, %	4,2	10,3	3,5
5	PBIAS, %	0,2	1,2	0,2
6	rSD	1,011	1,057	1,007
7	NSE	0,998	0,989	0,999
8	mNSE	0,962	0,914	0,965
9	ср	0,976	0,858	0,984
10	KGE	0,988	0,942	0,993

Анализ средней ошибки (ME) демонстрирует фундаментальное различие между подходами. Для вентилируемого экрана и скорректированного невентилируемого экрана значение составляет $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$, что находится в пределах допустимой погрешности измерения температуры воздуха согласно требованиям Всемирной метеорологической организации¹. Для невентилируемого экрана без коррекции этот показатель в пять раз выше ($0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$), что указывает на наличие выраженного систематического завышения температурных показаний. Эта закономерность подтверждает выводы, полученные при анализе функций плотности вероятности, где мода распределения для невентилируемого экрана была смещена в положительную сторону.

Особое внимание заслуживает анализ нормализованной среднеквадратической ошибки (NRMSE), которая характеризует относительную величину погрешности по отношению к естественной вариабельности измеряемого параметра. Для невентилируемого экрана значение NRMSE превышает 10%, что считается неудовлетворительным результатом в метеорологической практике и обусловлено наличием экстремально больших отклонений при высокой инсоляции. Скорректированный невентилируемый экран показывает наилучший результат (3,5%), что свидетельствует об эффективном устранении аномальных выбросов посредством математической коррекции.

Многокомпонентный критерий Клинга — Гупты (KGE), разработанный специально для комплексной оценки качества моделей [40], демонстрирует превосходство скорректированного подхода (0,993) над всеми альтернативными решениями. Этот критерий учитывает три ключевые компоненты — корреляцию между измеренными и эталонными данными, смещение средних значений и отношение стандартных отклонений, что обеспечивает всестороннюю оценку точности измерений.

Визуальное подтверждение статистических выводов представлено на двумерных диаграммах рассеяния параллельных измерений. Диаграммы рассеяния наглядно демонстрируют качество соответствия измеренных значений эталонным данным. Для скорректированного невентилируемого экрана линия регрессии практически точно совпадает с биссектрисой 1:1 ($R^2 = 0,999$), что указывает на отсутствие систематических отклонений и высокую линейность зависимости. Невентилируемый экран без коррекции показывает заметное отклонение регрессионной линии от идеальной зависимости ($R^2 = 0,996$), что количественно отражает наличие систематической погрешности, особенно выраженной при высоких температурах.

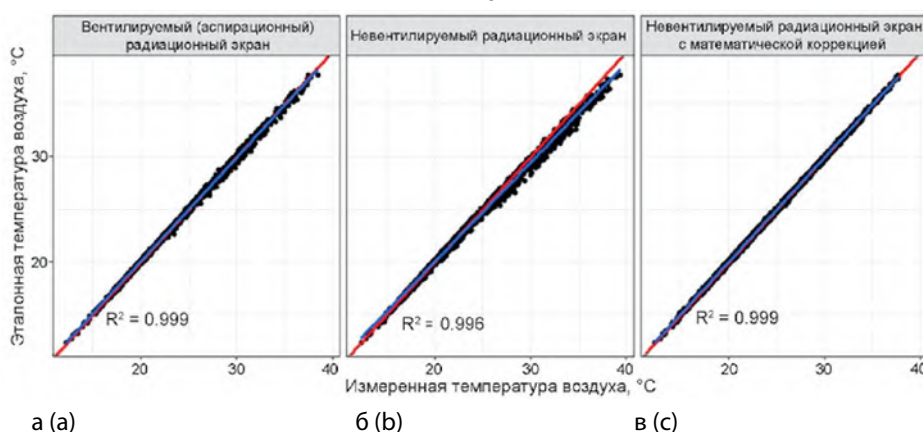
Совокупность представленных результатов убедительно демонстрирует, что разработанный алгоритм математической коррекции превосходит по всем статистическим показателям как не вентилируемые экраны без коррекции, так и технически более сложные вентилируемые системы, обеспечивая оптимальный баланс точности, экономичности и надежности для создания пространственно-распределенных сетей микроклиматического мониторинга виноградников.

Полученные экспериментальные данные позволяют провести углубленный анализ физических механизмов, определяющих эффективность различных подходов к минимизации радиационных погрешностей, и оценить перспективы их практического применения в агрометеорологическом мониторинге виноградников. Превосходство разработанного алгоритма математической коррекции над альтернативными техническими решениями объясняется не только высокой точностью описания процессов теплообмена, но и способностью адаптироваться к изменяющимся метеорологическим условиям в режиме реального времени, что принципиально отличает его от статических методов защиты.

Фундаментальное понимание причин наблюдаемых различий в эффективности исследованных методов требует рассмотрения динамики тепловых процессов в радиационных экранах. Анализ экспериментальных данных убедительно подтверждает теоретические предпосылки о доминирующей роли прямой солнечной радиации в формировании положительных температурных отклонений, что согласуется с результатами

Рис. 9. Двумерная диаграмма рассеяния параллельных измерений температуры воздуха для вентилируемого (а), невентилируемого (б) и скорректированного (в) радиационных экранов относительно эталонных данных за июнь — август 2023 года: красная линия — биссектриса 1:1, синяя линия — линейная регрессия

Fig. 9. Two-dimensional scatter plot of parallel air temperature measurements for ventilated (a), non-ventilated (b), and corrected (c) radiation shields relative to reference data for June — August 2023: red line — 1:1 bisector, blue line — linear regression



исследований da Cunha [20] и Sun и соавт. [21], которые отмечали критическое влияние инсоляции на точность измерений температуры воздуха. Однако принципиальным отличием настоящего исследования является учет конвективного теплообмена не только как функции скорости ветра, но и как процесса, зависящего от геометрических характеристик защитного устройства, что обеспечивает более точное описание реальных физических процессов.

Сравнение полученных результатов с данными литературы демонстрирует существенное превосходство разработанного подхода над ранее предложенными методами коррекции. В работах Yang и соавт. [29, 33] описаны алгоритмы коррекции, основанные на упрощенных моделях теплообмена, которые не учитывают влияние геометрии радиационного экрана на динамику конвективных процессов. Экспериментальная проверка этих методов на исследуемом радиационном экране показала систематическую недооценку температурных отклонений на 35–40%, что подтверждает критическую важность учета конструктивных особенностей защитных устройств. Аналогично применение формул Hubbard и Lin [23] приводило к неудовлетворительным результатам коррекции, поскольку их модель не отражает специфику теплообмена в многопластинчатых радиационных экранах.

Практическая значимость вентилируемых радиационных экранов, несмотря на их высокую теоретическую эффективность, существенно ограничивается эксплуатационными проблемами, которые становятся критическими при создании распределенных сетей мониторинга. Результаты длительных испытаний выявили три принципиальных недостатка аспирационных систем. Во-первых, повышенное энергопотребление вентиляторов сокращает время автономной работы, что требует установки более мощных систем питания или регулярной замены аккумуляторов. Во-вторых, механические компоненты подвержены отказам вследствие загрязнения пылью, попадания насекомых и износа подшипников, что снижает общую надежность системы согласно принципам теории надежности [42]. В-третьих, акустические помехи от работающих вентиляторов могут негативно влиять на поведение полезных насекомых в агроценозе винограда, что особенно критично для хозяйств, практикующих органическое земледелие.

Энергетическая эффективность разработанного метода математической коррекции представляет ключевое преимущество для создания плотных сетей мониторинга на больших площадях виноградников. Вычислительная сложность итерационного алгоритма остается умеренной даже для микроконтроллеров среднего класса: время выполнения одного цикла коррекции составляет менее 50 миллисекунд при частоте процессора 240 МГц, что позволяет выполнять расчеты

синхронно с частотой измерений датчика без значимого влияния на общее энергопотребление системы. Это обстоятельство открывает возможности для развертывания автономных узлов мониторинга с интервалами между техническими обслуживаниями до одного года, что критично для экономической целесообразности проектов точного виноградарства.

Ограничения предложенного метода коррекции проявляются преимущественно в экстремальных метеорологических условиях, когда упрощения, принятые в математической модели, приводят к накоплению остаточных погрешностей. Наиболее существенные отклонения наблюдаются при одновременном сочетании максимальной инсоляции свыше 1100 Вт/м², полном штиле и высоких температурах воздуха выше 35 °С, когда процессы свободной конвекции становятся соизмеримыми с вынужденной конвекцией. В таких условиях модель, основанная на суперпозиции конвективных механизмов согласно уравнению (5), может недооценивать сложность взаимодействия тепловых потоков. Тем не менее даже в этих экстремальных случаях максимальные отклонения не превышают 0,6 °С, а средние — составляют 0,2 °С, что остается приемлемым для большинства задач агрометеорологического мониторинга.

Универсальность разработанной математической модели подтверждается предварительными испытаниями на радиационных экранах альтернативных конструкций, включая однопластинчатые экраны и устройства с различными материалами поверхности. Результаты показали, что модификация только геометрических параметров F_1 , F_2 , F_3 и коэффициента альбедо A в уравнении (9) позволяет достичь сопоставимой точности коррекции для экранов диаметром от 80 до 200 мм, что охватывает большинство коммерчески доступных конструкций. Эта адаптивность модели создает предпосылки для стандартизации методов коррекции в агрометеорологической практике и снижения затрат на калибровку измерительных систем.

Перспективы дальнейшего совершенствования предложенного подхода связаны с расширением физической модели за счет учета дополнительных факторов, влияющих на точность измерений. Интеграция параметров влажности воздуха может повысить точность расчета теплофизических свойств среды, особенно при высоких температурах, когда изменение плотности воздуха становится значимым. Включение в модель температуры поверхности радиационного экрана посредством дополнительных датчиков позволит более точно описать процессы радиационного теплообмена и исключить необходимость эмпирической калибровки коэффициента k . Развитие методов машинного обучения открывает возможности для создания адаптивных алгоритмов коррекции, способных автоматически настраивать параметры модели на основе накопленного опыта измерений в конкретных климатических условиях.

Выводы/Conclusions

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность разработанных подходов к повышению точности измерения температуры воздуха с использованием доступных метеорологических устройств для виноградарства. На основе комплексного анализа экспериментальных данных можно сформулировать следующие основные выводы:

1. При использовании неветилируемых радиационных экранов в условиях интенсивной солнечной радиации наблюдаются существенные положительные отклонения измеренных значений температуры воздуха, достигающие 3 °C, что неприемлемо для точного микроклиматического мониторинга виноградарства.

2. Применение вентилируемых (аспирационных) радиационных экранов позволяет значительно минимизировать влияние солнечной радиации на показания датчиков, удерживая погрешность измерений в пределах 1 °C. Однако данное техническое решение сопряжено с повышенной стоимостью, необходимостью более частого обслуживания и сниженной надежностью системы в целом.

3. Разработанный алгоритм математической коррекции измерений, основанный на физической модели теплообмена с учетом интенсивности солнечной радиации и скорости ветра, позволяет достичь наилучших результатов с максимальными отклонениями не более 0,6 °C в экстремальных условиях и средними отклонениями

0,2 °C, что удовлетворяет требованиям агрометеорологического мониторинга виноградарства.

4. Разработан алгоритм итерационного решения с механизмами обработки сингулярных состояний и обеспечением устойчивой конвергенции для реализации в микроконтроллерных системах.

5. Представленная математическая модель, несмотря на учет геометрических характеристик радиационного экрана, сохраняет свойство универсальности и может быть адаптирована для различных типов защитных устройств посредством калибровки соответствующих коэффициентов.

Практическое применение разработанных методов коррекции открывает возможности для создания экономически эффективных систем пространственно-распределенного микроклиматического мониторинга на виноградниках, что имеет принципиальное значение для оптимизации агротехнических мероприятий, своевременного выявления рисков развития болезней и вредителей, а также повышения качества урожая.

Для дальнейшего совершенствования предложенного метода целесообразно проведение дополнительных исследований по расширению диапазона метеорологических условий, включению дополнительных параметров в математическую модель (таких как влажность воздуха и температура поверхности радиационного экрана), а также адаптации алгоритма для различных конструктивных исполнений защитных устройств.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FNZM-2025-0005 «Разработка методов предиктивной аналитики и развитие интеллектуальных технологий в виноградарстве»), а также проекта программы «Приоритет-2030» (№ госрегистрации 125092310677-9).

FUNDING

The study was supported within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. FNZM-2025-0005 "Development of predictive analytics methods and advancement of intelligent technologies in viticulture", as well as within the project of the program "Priority-2030" (state registration number 125092310677-9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jones G.V., Davis R.E. Using a synoptic climatological approach to understand climate-viticulture relationships. *International Journal of Climatology*. 2000; 20(8): 813–837. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<813::AID-JOC495>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<813::AID-JOC495>3.0.CO;2-W)
2. Korosi G.A., Mee P.T., Powell K.S. Influence of temperature and humidity on mortality of grapevine phylloxera *Daktulosphaira vitifoliae* clonal lineages: a scientific validation of a disinfection procedure for viticultural machinery. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2012; 18(1): 43–47. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00168.x>
3. Matese A. et al. Spatial variability of meteorological conditions at different scales in viticulture. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2014; 189–190: 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.020>
4. Ammoniaci M., Kartsiotis S.-P., Perria R., Storchi P. State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture. *Agriculture*. 2021; 11(3): 201. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030201>
5. Karimi N., Arabhosseini A., Karimi M., Kianmehr M.H. Web-based monitoring system using Wireless Sensor Networks for traditional vineyards and grape drying buildings. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 144: 269–283. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.018>

REFERENCES

1. Jones G.V., Davis R.E. Using a synoptic climatological approach to understand climate-viticulture relationships. *International Journal of Climatology*. 2000; 20(8): 813–837. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<813::AID-JOC495>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<813::AID-JOC495>3.0.CO;2-W)
2. Korosi G.A., Mee P.T., Powell K.S. Influence of temperature and humidity on mortality of grapevine phylloxera *Daktulosphaira vitifoliae* clonal lineages: a scientific validation of a disinfection procedure for viticultural machinery. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2012; 18(1): 43–47. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00168.x>
3. Matese A. et al. Spatial variability of meteorological conditions at different scales in viticulture. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2014; 189–190: 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.020>
4. Ammoniaci M., Kartsiotis S.-P., Perria R., Storchi P. State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture. *Agriculture*. 2021; 11(3): 201. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030201>
5. Karimi N., Arabhosseini A., Karimi M., Kianmehr M.H. Web-based monitoring system using Wireless Sensor Networks for traditional vineyards and grape drying buildings. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 144: 269–283. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.018>

6. Bramley R.G.V. Precision Viticulture: Managing vineyard variability for improved quality outcomes. Reynolds A.G. (ed.). *Managing Wine Quality*. 2nd Edition. Woodhead Publishing. 2021; 1: 541–586. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00002-6>
7. Romero P., Navarro J.M., Ordaz P.B. Towards a sustainable viticulture: The combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management*. 2022; 259: 107216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107216>
8. Darouich H. et al. Water Use and Soil Water Balance of Mediterranean Vineyards under Rainfed and Drip Irrigation Management: Evapotranspiration Partition and Soil Management Modelling for Resource Conservation. *Water*. 2022; 14(4): 554. <https://doi.org/10.3390/w14040554>
9. Cortiñas Rodríguez J.A., González-Fernández E., Fernández-González M., Vázquez-Ruiz R.A., Aira M.J. Fungal Diseases in Two North-West Spain Vineyards: Relationship with Meteorological Conditions and Predictive Aerobiological Model. *Agronomy*. 2020; 10(2): 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020219>
10. Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Y., Shchekin V.Y., Koltsov A.D., Kabankova E.N. Intelligent complex of monitoring and diagnostics of grape plantations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 981: 032020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032020>
11. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю. Технология автоматизированного мониторинга состояния виноградника. *Аграрная наука*. 2023; (3): 109–116. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-109-116>
12. Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю. Автоматизированный технологический комплекс мониторинга и диагностики виноградников. *Вестник аграрной науки Дона*. 2021; (4): 16–23. <https://elibrary.ru/auqdkc>
13. Onesti G., González-Domínguez E., Rossi V. Accurate prediction of black rot epidemics in vineyards using a weather-driven disease model. *Pest Management Science*. 2016; 72(12): 2321–2329. <https://doi.org/10.1002/ps.4277>
14. Sadras V.O., Petrie P.R. Predicting the time course of grape ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2012; 18(1): 48–56. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00169.x>
15. Sirsat M.S., Mendes-Moreira J., Ferreira C., Cunha M. Machine Learning predictive model of grapevine yield based on agroclimatic patterns. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019; 12(4): 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.07.003>
16. Ohana-Levi N., Munitz S., Netzer Y. Grapevine stem water potential seasonal curves: response to meteorological conditions, and association to yield and red wine quality. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 342: 109755. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109755>
17. Treder W., Klamkowski K., Tryngiel-Gač A., Wójcik K. Evaluating the suitability of a new telemetric capacitance-based measurement system for real-time application in irrigation and fertilization management. *Journal of Water and Land Development*. 2023; 56(1–3): 67–73. <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143746>
18. Ferrández-Pastor F.J., García-Chamizo J.M., Nieto-Hidalgo M., Mora-Martínez J. Precision Agriculture Design Method Using a Distributed Computing Architecture on Internet of Things Context. *Sensors*. 2018; 18(6): 1731. <https://doi.org/10.3390/s18061731>
19. Ioannou K., Karampatzakis D., Amanatidis P., Aggelopoulos V., Karmiris I. Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things. *Information*. 2021; 12(4): 146. <https://doi.org/10.3390/info12040146>
20. da Cunha A.R. Evaluation of measurement errors of temperature and relative humidity from HOBO data logger under different conditions of exposure to solar radiation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015; 187(5): 236. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4458-x>
21. Sun X., Yan S., Wang B., Xia L., Liu Q., Zhang H. Air Temperature Error Correction Based on Solar Radiation in an Economical Meteorological Wireless Sensor Network. *Sensors*. 2015; 15(8): 18114–18139. <https://doi.org/10.3390/s150818114>
22. Erell E., Leal V., Maldonado E. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary-Layer Meteorology*. 2005; 114(1): 205–231. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-8946-8>
23. Hubbard K.G., Lin X. Realtime data filtering models for air temperature measurements. *Geophysical Research Letters*. 2002; 29(10): 67–1–67–4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013191>
6. Bramley R.G.V. Precision Viticulture: Managing vineyard variability for improved quality outcomes. Reynolds A.G. (ed.). *Managing Wine Quality*. 2nd Edition. Woodhead Publishing. 2021; 1: 541–586. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00002-6>
7. Romero P., Navarro J.M., Ordaz P.B. Towards a sustainable viticulture: The combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management*. 2022; 259: 107216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107216>
8. Darouich H. et al. Water Use and Soil Water Balance of Mediterranean Vineyards under Rainfed and Drip Irrigation Management: Evapotranspiration Partition and Soil Management Modelling for Resource Conservation. *Water*. 2022; 14(4): 554. <https://doi.org/10.3390/w14040554>
9. Cortiñas Rodríguez J.A., González-Fernández E., Fernández-González M., Vázquez-Ruiz R.A., Aira M.J. Fungal Diseases in Two North-West Spain Vineyards: Relationship with Meteorological Conditions and Predictive Aerobiological Model. *Agronomy*. 2020; 10(2): 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020219>
10. Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Y., Shchekin V.Y., Koltsov A.D., Kabankova E.N. Intelligent complex of monitoring and diagnostics of grape plantations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 981: 032020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032020>
11. Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Yu., Voronin D.Yu. Technology of automated monitoring of the vineyard condition. *Agrarian science*. 2023; (3): 109–116 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-109-116>
12. Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Yu. Automated technological complex for monitoring and diagnostic vineyard. *Don agrarian science bulletin*. 2021; (4): 16–23 (in Russian). <https://elibrary.ru/auqdkc>
13. Onesti G., González-Domínguez E., Rossi V. Accurate prediction of black rot epidemics in vineyards using a weather-driven disease model. *Pest Management Science*. 2016; 72(12): 2321–2329. <https://doi.org/10.1002/ps.4277>
14. Sadras V.O., Petrie P.R. Predicting the time course of grape ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2012; 18(1): 48–56. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00169.x>
15. Sirsat M.S., Mendes-Moreira J., Ferreira C., Cunha M. Machine Learning predictive model of grapevine yield based on agroclimatic patterns. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019; 12(4): 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.07.003>
16. Ohana-Levi N., Munitz S., Netzer Y. Grapevine stem water potential seasonal curves: response to meteorological conditions, and association to yield and red wine quality. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 342: 109755. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109755>
17. Treder W., Klamkowski K., Tryngiel-Gač A., Wójcik K. Evaluating the suitability of a new telemetric capacitance-based measurement system for real-time application in irrigation and fertilization management. *Journal of Water and Land Development*. 2023; 56(1–3): 67–73. <https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143746>
18. Ferrández-Pastor F.J., García-Chamizo J.M., Nieto-Hidalgo M., Mora-Martínez J. Precision Agriculture Design Method Using a Distributed Computing Architecture on Internet of Things Context. *Sensors*. 2018; 18(6): 1731. <https://doi.org/10.3390/s18061731>
19. Ioannou K., Karampatzakis D., Amanatidis P., Aggelopoulos V., Karmiris I. Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things. *Information*. 2021; 12(4): 146. <https://doi.org/10.3390/info12040146>
20. da Cunha A.R. Evaluation of measurement errors of temperature and relative humidity from HOBO data logger under different conditions of exposure to solar radiation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015; 187(5): 236. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4458-x>
21. Sun X., Yan S., Wang B., Xia L., Liu Q., Zhang H. Air Temperature Error Correction Based on Solar Radiation in an Economical Meteorological Wireless Sensor Network. *Sensors*. 2015; 15(8): 18114–18139. <https://doi.org/10.3390/s150818114>
22. Erell E., Leal V., Maldonado E. Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary-Layer Meteorology*. 2005; 114(1): 205–231. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-8946-8>
23. Hubbard K.G., Lin X. Realtime data filtering models for air temperature measurements. *Geophysical Research Letters*. 2002; 29(10): 67–1–67–4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013191>

24. Hubbard J.A. An Inexpensive Alternative Solar Radiation Shield for Ambient Air Temperature Micro-Sensors. *Journal of Natural & Environmental Sciences*. 2011; 2(2): 9–14.
25. Tarara J.M., Hoheisel G.-A. Low-cost Shielding to Minimize Radiation Errors of Temperature Sensors in the Field. *HortScience*. 2007; 42(6): 1372–1379.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.6.1372>
26. Yang J., Deng X., Liu Q., Ding R. Design and experimental study of an effective, low-cost, naturally ventilated radiation shield for monitoring surface air temperature. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2021; 133(2): 349–357.
<https://doi.org/10.1007/s00703-020-00754-1>
27. Richardson S.J., Brock F.V., Semmer S.R., Jirak C. Minimizing Errors Associated with Multiplate Radiation Shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999; 16(11): 1862–1872.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1862:MEAWMR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1862:MEAWMR>2.0.CO;2)
28. Yang S.-H., Lee C.-G., Kim J.-Y., Lee W.-K., Ashtinai-Araghi A., Rhee J.-Y. Effects of Fan-Aspirated Radiation Shield for Temperature Measurement in Greenhouse Environment. *Journal of Biosystems Engineering*. 2012; 37(4): 245–251.
<https://doi.org/10.5307/JBE.2012.37.4.245>
29. Yang J., Liu Q., Dai W., Ding R. A temperature error correction method for a naturally ventilated radiation shield. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016; 149: 40–45.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.09.010>
30. Georges C., Kaser G. Ventilated and unventilated air temperature measurements for glacier-climate studies on a tropical high mountain site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2002; 107(D24): ACL15-1–ACL15-10.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002503>
31. Jenkins G. A comparison between two types of widely used weather stations. *Weather*. 2014; 69(4): 105–110.
<https://doi.org/10.1002/wea.2158>
32. Dai W., Tan M., Zhu H. Design of a radiation shield applied to surface air temperature monitoring. *Journal of Instrumentation*. 2023; 18: P02015.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02015>
33. Yang J., Liu Q., Dai W. A method for solar radiation error correction of temperature measured in a reinforced plastic screen for climatic data collection. *International Journal of Climatology*. 2018; 38(3): 1328–1336.
<https://doi.org/10.1002/joc.5247>
34. Matese A., Di Gennaro S.F., Zaldei A., Genesio L., Vaccari F.P. A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2009; 69(1): 51–58.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.016>
35. Morais R., Fernandes M.A., Matos S.G., Seródio C., Ferreira P.J.S.G., Reis M.J.C.S. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008; 62(2): 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.12.004>
36. Hubbard K.G., Lin X., Walter-Shea E.A. The Effectiveness of the ASOS, MMTS, Gill, and CRS Air Temperature Radiation Shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001; 18(6): 851–864.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0851:TEOTAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0851:TEOTAM>2.0.CO;2)
37. Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th Edition. New York: Wiley. 1996; xxiii, 886. ISBN 0471304603
38. Agarwal, Divya, Sneh J. Devra, Tiwari A. Probability and probability distribution as decision making tool in agriculture: A review. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*. 2024; 9(5): 208–213
39. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. 2-е изд. М.: Физматлит. 2012; 816.
40. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50(3): 885–900.
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
41. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009; 377(1–2): 80–91.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
42. Rausand M., Barros A., Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. 3rd Edition. Wiley. 2020; 864. ISBN 978-1-119-37352-0
24. Hubbard J.A. An Inexpensive Alternative Solar Radiation Shield for Ambient Air Temperature Micro-Sensors. *Journal of Natural & Environmental Sciences*. 2011; 2(2): 9–14.
25. Tarara J.M., Hoheisel G.-A. Low-cost Shielding to Minimize Radiation Errors of Temperature Sensors in the Field. *HortScience*. 2007; 42(6): 1372–1379.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.6.1372>
26. Yang J., Deng X., Liu Q., Ding R. Design and experimental study of an effective, low-cost, naturally ventilated radiation shield for monitoring surface air temperature. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2021; 133(2): 349–357.
<https://doi.org/10.1007/s00703-020-00754-1>
27. Richardson S.J., Brock F.V., Semmer S.R., Jirak C. Minimizing Errors Associated with Multiplate Radiation Shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999; 16(11): 1862–1872.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1862:MEAWMR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1862:MEAWMR>2.0.CO;2)
28. Yang S.-H., Lee C.-G., Kim J.-Y., Lee W.-K., Ashtinai-Araghi A., Rhee J.-Y. Effects of Fan-Aspirated Radiation Shield for Temperature Measurement in Greenhouse Environment. *Journal of Biosystems Engineering*. 2012; 37(4): 245–251.
<https://doi.org/10.5307/JBE.2012.37.4.245>
29. Yang J., Liu Q., Dai W., Ding R. A temperature error correction method for a naturally ventilated radiation shield. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016; 149: 40–45.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.09.010>
30. Georges C., Kaser G. Ventilated and unventilated air temperature measurements for glacier-climate studies on a tropical high mountain site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2002; 107(D24): ACL15-1–ACL15-10.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002503>
31. Jenkins G. A comparison between two types of widely used weather stations. *Weather*. 2014; 69(4): 105–110.
<https://doi.org/10.1002/wea.2158>
32. Dai W., Tan M., Zhu H. Design of a radiation shield applied to surface air temperature monitoring. *Journal of Instrumentation*. 2023; 18: P02015.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02015>
33. Yang J., Liu Q., Dai W. A method for solar radiation error correction of temperature measured in a reinforced plastic screen for climatic data collection. *International Journal of Climatology*. 2018; 38(3): 1328–1336.
<https://doi.org/10.1002/joc.5247>
34. Matese A., Di Gennaro S.F., Zaldei A., Genesio L., Vaccari F.P. A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2009; 69(1): 51–58.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.016>
35. Morais R., Fernandes M.A., Matos S.G., Seródio C., Ferreira P.J.S.G., Reis M.J.C.S. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008; 62(2): 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.12.004>
36. Hubbard K.G., Lin X., Walter-Shea E.A. The Effectiveness of the ASOS, MMTS, Gill, and CRS Air Temperature Radiation Shields. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001; 18(6): 851–864.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0851:TEOTAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0851:TEOTAM>2.0.CO;2)
37. Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th Edition. New York: Wiley. 1996; xxiii, 886. ISBN 0471304603
38. Agarwal, Divya, Sneh J. Devra, Tiwari A. Probability and probability distribution as decision making tool in agriculture: A review. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*. 2024; 9(5): 208–213
39. Kobzar A.I. Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Researchers. 2nd Edition. Moscow: Fizmatlit. 2012; 816 (in Russian).
40. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50(3): 885–900.
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
41. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009; 377(1–2): 80–91.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
42. Rausand M., Barros A., Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. 3rd Edition. Wiley. 2020; 864. ISBN 978-1-119-37352-0

ОБ АВТОРАХ

Павел Николаевич Кузнецов^{1,2}

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник¹;
кандидат технических наук, доцент²
PNKuznetsov@sevsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1732-922X>

Дмитрий Юрьевич Котельников^{1,2}

младший научный сотрудник¹;
доцент²
DYKotelnikov@ya.ru
<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-9065-243X>

Владислав Павлович Евстигнеев²

кандидат физико-математических наук,
доцент
VPEvstigneev@sevsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3064-2613>

Дмитрий Юрьевич Воронин¹

кандидат технических наук, доцент
dima_77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6053-4758>

¹Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ул. Кирова, 31, Ялта, 298600, Россия

²Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Pavel Nikolaevich Kuznetsov^{1,2}

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher¹;
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor²
PNKuznetsov@sevsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1732-922X>

Dmitry Yurievich Kotelnikov^{1,2}

Junior Research Assistant¹;
Associate Professor²
DYKotelnikov@ya.ru
<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-9065-243X>

Vladislav Pavlovich Evstigneev²

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor
VPEvstigneev@sevsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3064-2613>

Dmitry Yurievich Voronin¹

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
dima_77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6053-4758>

¹All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of the Nationale Research Center "Kurchatov Institute",

31 Kirova Str., Yalta, 298600, Russia

²Sevastopol State University,
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russia



Достойное вознаграждение за привлеченную рекламу от ИД «Аграрная наука»

Вы

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

Мы гарантируем

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

Звоните +7 (916) 616-05-31

Реклама

УДК 633.111: 664-405

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-159-166

Elena A. Kuznetsova^{1, 2}Maksim B. Rebezov^{3, 4} ✉Nikolay I. Bondarev¹Davaasuren Lkhagvadolgor⁵¹Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia²Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia³Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia⁴Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia⁵Mongolian University of Science and Technology (School of Technology, Darkhan), Ulaanbaatar, Mongolia

✉ rebezov@yandex.ru

Received by the editorial office: 11.09.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© Kuznetsova E.A., Rebezov M.B., Bondarev N.I., Lkhagvadolgor D.

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-159-166

Е.А. Кузнецова^{1, 2}М.Б. Ребезов^{3, 4} ✉Н.И. Бондарев¹Д. Лхагвадолгор⁵¹Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орёл, Россия²Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия³Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия⁴Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия⁵Монгольский университет науки и технологии, Школа технологии в Дархане, Улан-Батор, Монголия

✉ rebezov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 11.09.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Кузнецова Е.А., Ребезов М.Б., Бондарев Н.И., Лхагвадолгор Д.

Development of an innovative starter culture for use in whole grain bread technology

ABSTRACT

Relevance. Probiotic-based starter cultures are used to improve the quality and safety of whole-grain bread. *The aim of the study* is to use plant substrates with prebiotic properties as fermentation media. Whole-grain buckwheat flour, rich in antioxidants, essential amino acids, vitamins and minerals, can serve as such a substrate. Fermentation using probiotic starter cultures in whole grain bread technology increases the bioavailability of active compounds, nutritional value and microbiological safety of the product.

Methods. Experimental data are presented on the effect of whole-milled buckwheat flour on the growth of lactic acid bacteria and a probiotic yeast strain during the production of thick starter cultures. The antagonistic properties of starter microorganisms against *Bacillus subtilis* and mold fungi of the genera *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, and *Rhizopus* were studied, along with the fermentative activity of the starter. The optimal dosage of thick buckwheat probiotic starter for whole wheat bread production was determined, along with the amino acid composition and antioxidant activity of the resulting bread.

Results. It was found that starter strains developed better in a medium made from the Bashkir Red-Stem buckwheat variety. Antagonistic activity of the studied lactic acid bacteria and yeast strains was observed against *Bacillus subtilis* VKM-B-501 and certain mold strains of *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, and *Rhizopus*. The most promising lactic acid bacteria strains were selected for creating a thick buckwheat probiotic starter. The starter was deemed suitable for baking applications. The optimal amount of thick buckwheat probiotic starter was 40% of the mass of dispersed wheat grain. Using this starter in whole wheat bread technology resulted in bread with enhanced antioxidant activity and a more balanced amino acid profile.

Key words: buckwheat grain, probiotics, antagonistic activity, thick buckwheat starter, whole grain bread

For citation: Kuznetsova E.A., Rebezov M.B., Bondarev N.I., Lkhagvadolgor D. Development of an innovative starter culture for use in whole grain bread technology. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 159–166.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-159-166>

Разработка инновационной закваски для использования в технологии цельнозернового хлеба

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Для повышения качества и безопасности цельнозернового хлеба используются закваски на основе пробиотиков. *Задача исследования* — использование в качестве сред для ферментации растительных субстратов с пребиотическими свойствами. В качестве такого субстрата может служить цельнозерновая гречневая мука, богатая антиоксидантами, незаменимыми аминокислотами, витаминами и минералами. Ферментация с использованием пробиотических заквасок в технологии цельнозернового хлеба повышает биодоступность активных соединений, пищевую ценность и микробиологическую безопасность продукта.

Методы. Представлены экспериментальные данные о влиянии цельнозерновой гречневой муки на рост молочнокислых бактерий и пробиотического штамма дрожжей при производстве густых заквасок. Изучены антагонистические свойства заквасочных микроорганизмов по отношению к *Bacillus subtilis* и плесневым грибам родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* и *Rhizopus*, а также ферментативная активность закваски. Определены оптимальная дозировка густой гречневой пробиотической закваски для производства цельнозернового хлеба, аминокислотный состав и антиоксидантная активность полученного хлеба.

Результаты. Установлено, что заквасочные штаммы лучше развиваются на питательной среде, приготовленной из гречихи сорта Башкирская красноперея. Антагонистическая активность изученных штаммов молочнокислых бактерий и дрожжей отмечена по отношению к *Bacillus subtilis* VKM-B-501 и некоторым штаммам плесневых грибов родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* и *Rhizopus*. Для создания густой гречневой пробиотической закваски отобраны наиболее перспективные штаммы молочнокислых бактерий. Закваска признана пригодной для хлебопекарного применения. Оптимальное количество густой гречневой пробиотической закваски составило 40% от массы диспергированного зерна пшеницы. Использование этой закваски в технологии цельнозернового хлеба позволило получить хлеб с повышенной антиоксидантной активностью и более сбалансированным аминокислотным составом.

Ключевые слова: гречневая крупа, пробиотики, антагонистическая активность, густая гречневая закваска, цельнозерновой хлеб

Для цитирования: Кузнецова Е.А., Ребезов М.Б., Бондарев Н.И., Лхагвадолгор Д. Разработка инновационной закваски для использования в технологии цельнозернового хлеба. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 159–166 (in English). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-159-166>

Introduction/Введение

Sourdough fermentation positively influences the nutritional value of grain-based products by slowing starch digestion and enhancing protein assimilation, which regulates the levels of bioactive compounds including vitamins and minerals [1–3].

Sourdough dominated by lactic acid bacteria has attracted research interest for its potential to improve the overall quality of grain products [4–6].

Probiotics and prebiotics can exert a synergistic effect, as prebiotics promote the growth and activity of probiotics [7–9].

Inulin, lactulose, oligofructose, and polydextrose are proven prebiotics that enhance the proliferation of probiotic strains [10].

Currently, there is a growing interest in unconventional plant-based raw materials rich in prebiotics. Due to its composition, buckwheat seeds are a valuable source of nutrients and have a beneficial impact on human health. A buckwheat-based diet lowers serum cholesterol, improves diabetic conditions by reducing sugar absorption, and supports the growth of beneficial gut bacteria. D-chiro-inositol found in buckwheat helps reduce insulin resistance and enhances insulin action [11]. The nutritional value of buckwheat flour rich in complex carbohydrates, proteins, essential vitamins, minerals, and antioxidants makes it a promising source of prebiotic components for human nutrition and probiotic bacteria [12–15].

Buckwheat is known to possess prebiotic properties. Methanol extracts from buckwheat accelerate the growth of lactic acid bacteria in carbon-free media while inhibiting *Clostridium perfringens* and *Escherichia coli*. This suggests how gut bacteria may respond to buckwheat [16]. Naturally fermented buckwheat cultures or products have proven to be excellent substrates for probiotic bacteria, especially *Lactobacillus* strains. Buckwheat has been shown to reduce populations of *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, *Helicobacteraceae*, *Clostridium*, and *Escherichia*, while increasing *Peptoclostridium*, *Prevotellaceae*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Enterococcus*, and *Eubacteriaceae* [17].

Studies confirm that aqueous suspensions of buckwheat groats serve as effective prebiotic substrates for lactic acid bacteria, maintaining their viability during storage. Specifically, a 5% buckwheat flour suspension supported active growth of *Lactobacillus* and *Streptococcus thermophilus*: after 24 hours of fermentation, 7 out of 14 strains reached concentrations of 9.00 log CFU/mL. The metabolic activity of *L. casei* strains (2K and Y) in buckwheat substrate varied: despite similar cell counts after fermentation, pH values differed [18]. It was also shown that buckwheat-based beverages provide a suitable medium for the growth of *Lactobacillus* and *Bifidobacteria* populations. Fermented buckwheat groats acquire

beneficial properties and may be used to prevent lifestyle diseases such as diabetes, obesity, and cancer [19].

Several researchers associate whole grain consumption with improved health outcomes. Two major risk factors for cardiovascular disease total cholesterol and low-density lipoproteins in serum did not increase with the consumption of whole grain products, suggesting a cardioprotective role [3, 20, 21].

From a quality improvement perspective, sourdough with lactic acid bacteria as the dominant microflora is of greater research interest than pure yeast fermentation [4, 22–24].

Using sourdough in bread production leads to hydrolysis of dietary fibers, reduced lipid oxidation, improved digestibility of proteins and starch, and increased vitamin content and mineral bioavailability [25]. Phytic acid in grains exists as complexes with metal cations and proteins. Its enzymatic breakdown requires an optimal pH level, which can be achieved through natural fermentation. This degradation significantly increases the amount of soluble iron, zinc, and calcium in fermented grain products [26].

Although the health effects of sourdough bread consumption are not fully understood, Abbondio *et al.* [27] provide evidence that sourdough bread intake can significantly alter gut microbiota taxonomy and the metabolic functions of key microbial groups, including *Bacteroides* and *Clostridium*.

Some studies have examined the effect of adding buckwheat sourdough to wheat bread at levels of 10–20% of total flour. This approach shortens the technological process, improves rheological and sensory properties, and enhances the quality and nutritional value of bread [28–30].

The aim of this study was to develop an innovative starter culture based on whole-milled buckwheat grain and probiotic strains for use in the production of whole wheat bakery products.

Materials and methods /

Материалы и методы исследования

The study focused on common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) of two varieties: Bashkir krasnostebel'naya and Dikul. Pure cultures of *Saccharomyces boulardii* Y 3925 yeast and *Lactobacillus brevis* B78 lactic acid bacteria were used from the industrial microorganism museum collection. Additional strains included *Streptococcus thermophilus* TC 14, TC 91, *Lactobacillus acidophilus* AP Ac, and AP A97 from the pure culture museum of the Federal State Scientific Institution "VNIMI". All strains were stored in lyophilized form at 4–8 °C. Before inoculation, microorganisms were acclimated at room temperature (22 °C) for 2 hours¹. All microbiological work was conducted under aseptic conditions in a laminar flow cabinet.

¹ GOST ISO 7218-2015 Microbiology of food and animal feed. General requirements and recommendations for microbiological testing.

Saccharomyces boulardii Y 3925 yeast cultures were revived on Sabouraud medium, while lactic acid bacteria were cultured on MRS medium.

To assess antagonistic activity, pure cultures of *Bacillus subtilis* VKM-B-501, *Aspergillus flavus* VKM-F-1024, *Aspergillus candidus* VKM-F-3908, *Penicillium crustosum* VKM-F-4080, *Penicillium expansion* VKM-F-275, *Mucor mucedo* VKM-F-1257, *Mucor racemosus* var. *sphaerosporus* VKM-F-541, and *Rhizopus stolonifer* VKM-F-2005 were used. Antagonistic activity was studied using the agar diffusion method with supernatants of culture fluids.

Thick buckwheat sourdough was prepared by milling buckwheat grain to particle sizes under 0.35 mm using an SM 200 mill. A suspension was made by mixing flour with water at a 1:3 ratio. Lactic acid bacteria and yeast biomass were washed from culture media and added to the suspension. The mixture was incubated at 30–32 °C for 48 hours until reaching an acidity of 8–10 °C in a thermostat. During fermentation, the mass increased 2–3 times. The sourdough was stored in sealed containers under refrigeration.

For bread preparation, soft winter wheat grain of the Mironovskaya 808 variety was cleaned and soaked for 10 hours. Excess water was drained, and the grain was twice dispersed using a Homogenizer 1094 (Tekator). Sourdough was added in varying amounts (20 to 60%). Additionally, 4% dry wheat gluten (based on dispersed wheat mass) was added to improve bread quality. Dough was manually kneaded, fermented in a chamber at 35 °C and 75–80% humidity, and baked at 220 °C. Proofing and baking were done using PRSH-1 and PRSH-11 ovens. Control bread was prepared using the straight dough method per GOST 31805–2018². Organoleptic and physicochemical analyses were conducted four hours post-baking.

Lactic acid bacteria counts were measured using a DEN-1B densitometer and McFarland turbidity standards.

Reducing sugars were determined by the semi-micro titrimetric method of K.N. Chizhova and A.N. Sonkina, based on copper oxide reduction in Fehling's solution³.

α -Amino nitrogen content was measured by titration, based on the formation of soluble copper complexes with amino acids and peptides, followed by iodometric titration³.

Antioxidant activity was measured spectrophotometrically in ethanol extracts at 515 nm, using the DPPH radical inhibition method described by Silva *et al.* [31].

Free and protein-bound amino acids were quantified after hydrolysis in sealed ampoules with 6N HCl for 24 hours, using ion-exchange chromatography and electrochemical detection on a Chromaspek amino acid analyzer.

Results and discussion /

Результаты и обсуждение

Demand for health-promoting foods has increased, and whole grain sourdough bread fits this category. To select suitable lactic acid bacteria strains for sourdough, microbial growth was studied in media made from whole-milled buckwheat of two varieties after 24 and 48 hours of incubation. Results are shown in Table 1.

The Bashkir krasnostebel'naya variety proved more suitable due to its higher content of bioactive compounds. These compounds enhance probiotic bacterial growth, resulting in 7.8–21.6% higher counts compared to the Dikul variety. Since *S. boulardii* yeast is included in the sourdough, selecting lactic acid bacteria that allow for alcoholic fermentation is crucial. *S. boulardii* tolerates low pH better than other *Saccharomyces* species, making it suitable for sourdough and fermented dairy products⁴. Although *Lactobacillus acidophilus* AP Ac grew well, it produced excessive lactic acid, lowering pH to 4.3 after 48 hours, and was excluded from the sourdough formulation.

A key criterion for selecting lactic acid bacteria strains for sourdough used in grain bread is antagonistic activity against spore-forming bacteria and storage molds. These contaminants enter bread production via raw materials (flour, yeast, additives) and equipment surfaces [32]. Spore-forming bacteria and molds are typically concentrated in the outer grain layers and are especially common in whole grain bread [33, 34].

The antagonistic activity of selected lactic acid bacteria and yeast strains was tested against *Bacillus subtilis* VKM-B-501 and mold strains of *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, and *Rhizopus* (Table 2). The results confirmed that the studied strains exhibited inhibitory effects on these microorganisms, indicating

Table 1. The number of lactic acid bacteria during growth in the starter medium

A strain of lactic acid bacteria	24 hours of temperature control		48 hours of temperature control	
	Number of bacteria (CFU/ml)	pH	Number of bacteria (CFU/ml)	pH
Bashkir krasnostebel'naya buckwheat				
<i>Streptococcus thermophilus</i> TC 14	1,66×10 ⁹	5,1	2,25×10 ⁹	4,8
<i>Streptococcus thermophilus</i> TC 91	1,69×10 ⁹	5,2	2,29×10 ⁹	4,5
<i>Lactobacillus acidophilus</i> AP Ac	3,05×10 ⁹	6,0	3,55×10 ⁹	4,3
<i>Lactobacillus acidophilus</i> AP A97	2,58×10 ⁹	5,8	3,15×10 ⁹	4,5
<i>Lactobacillus brevis</i> -B78	2,10×10 ⁹	5,9	3,14×10 ⁹	4,6
Dikul buckwheat				
<i>Streptococcus thermophilus</i> TC 14	1,55×10 ⁹	5,0	2,00×10 ⁹	4,8
<i>Streptococcus thermophilus</i> TC 91	1,57×10 ⁹	5,0	2,06×10 ⁹	4,7
<i>Lactobacillus acidophilus</i> AP Ac	2,98×10 ⁹	5,6	3,30×10 ⁹	4,6
<i>Lactobacillus acidophilus</i> AP A97	2,07×10 ⁹	5,8	2,59×10 ⁹	4,6
<i>Lactobacillus brevis</i> -B78	1,88×10 ⁹	5,9	2,78×10 ⁹	4,6

² GOST 31805–2018 Bakery products made from wheat flour. General specifications.

³ Eliseeva S.I. Quality control of raw materials, semi-finished products and finished products at bakeries. Moscow: Agropromizdat. 1987; 128.

⁴ Soboleva E.V. Substantiation of the use of *Saccharomyces cerevisiae* yeast strain RCAM 01730 in the technology of wheat bread with increased microbiological resistance. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg. 2014; 142.

their potential to improve the microbiological safety of read.

It was established that when the supernatant of the culture fluid of *Saccharomyces boulardii* VKPM-Y-3925 was introduced into wells, zones of inhibition were observed against *Bacillus subtilis*, the causative agent of potato disease in bread. Similar findings were reported by E.V. Soboleva [33], who studied the antagonistic effect of *Saccharomyces boulardii* strain RCAM 01730 against *Bacillus subtilis* VKM 120.

Experimental research revealed that the probiotic strains suppressed the development of typical mold strains responsible for spoilage of bakery products. Overall, the yeast strain *Saccharomyces boulardii* VKPM-Y-3925 exhibited stronger antagonistic activity against the tested mold cultures compared to the lactic acid bacteria strains. The studied *Streptococcus thermophilus* strains showed no antagonistic activity against *Aspergillus flavus*.

These findings confirm the antagonistic activity of the probiotic strains against the studied mold fungi and spore-forming *Bacillus* bacteria, indicating their potential use in imparting antimicrobial properties to bakery products. Based on the combined properties studied, the following microorganisms were selected for the sourdough formulation: homofermentative lactic acid bacteria *Streptococcus thermophilus* TC 14, *Lactobacillus acidophilus* AP A97, heterofermentative *Lactobacillus brevis*-B78, and yeast *Saccharomyces boulardii* VKPM-Y-3925.

The characteristics of the resulting thick buckwheat probiotic sourdough (Table 3) demonstrate its suitability for baking applications.

The developed thick probiotic sourdough, based on probiotic microorganisms and whole-milled buckwheat flour of the Bashkir Red-Stem variety, was applied in whole wheat bread technology. Prior to this, the fermentative activity of the sourdough microorganisms was studied by tracking the accumulation dynamics of free amino nitrogen and reducing sugars over two hours of fermentation (Fig. 1).

It was found that during two hours of fermentation, the levels of amino nitrogen and reducing sugars in the dough decreased by 27.3% and 12%, respectively, indicating active consumption of these compounds by the sourdough microorganisms. These experimental results confirm the high fermentative activity of the sourdough strains.

To determine the optimal sourdough dosage for whole grain bread technology, trial baking

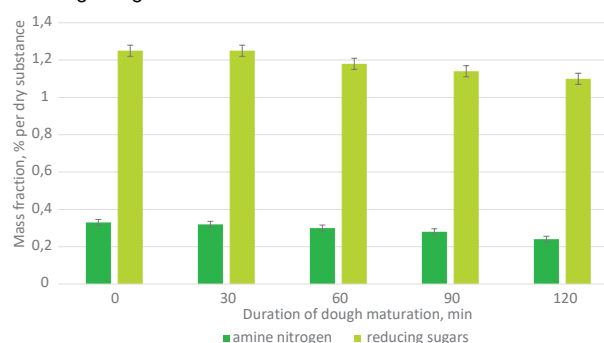
Table 2. The effect of lactic acid bacteria and *S. boulardii* strains on the development of test cultures of mold pathogens and potato bread disease

Test cultures	The diameters of the growth inhibition zones of the test cultures of microorganisms under the influence of the studied bacteria and yeast <i>S. boulardii</i> , mm				
	<i>Streptococcus thermophilus</i> TC 14	<i>Streptococcus thermophilus</i> TC 91	<i>Lactobacillus acidophilus</i> AP A97	<i>Lactobacillus brevis</i> -B78	<i>Saccharomyces boulardii</i> VKPM-Y-3925
<i>Bacillus subtilis</i> VKM-B-501	6,5 ± 0,6	8,1 ± 0,6	10,3 ± 0,6	9,3 ± 0,6	11,7 ± 0,6
<i>Aspergillus candidus</i> VKM-F-3908	8,0 ± 0,6	9,1 ± 0,6	8,5 ± 0,6	7,8 ± 0,6	11,3 ± 0,6
<i>Aspergillus flavus</i> VKM-F-1024	the zone is missing	the zone is missing	8,0 ± 0,6	8,3 ± 0,6	9,7 ± 0,6
<i>Penicillium expansion</i> VKM-F-275	6,8 ± 0,6	7,2 ± 0,6	6,3 ± 0,6	8,7 ± 0,6	12,3 ± 0,6
<i>Penicillium crustosum</i> VKM-F-4080	8,7 ± 0,6	9,7 ± 0,6	the zone is missing	10,3 ± 0,6	11,7 ± 0,6
<i>Mucor mucedo</i> VKM-F-1257	the zone is missing	6,7 ± 0,6	8,3 ± 0,6	the zone is missing	10,7 ± 0,6
<i>Mucor racemosus</i> var. <i>sphaerosporus</i> VKM-F-541	the zone is missing	6,3 ± 0,6	10,7 ± 0,6	9,2 ± 0,6	the zone is missing
<i>Rhizopus stolonifer</i> VKM-F-2005	9,5 ± 0,6	10,1 ± 0,6	the zone is missing	8,3 ± 0,6	9,3 ± 0,6

Table 3. Characteristics of the Sourdough

Indicator	Thick Buckwheat Sourdough
Moisture content, %	49.86 ± 0.1
Titrated acidity, deg	13.4 ± 1.0
Fermentation activity, min	5.0 ± 1.0
Lifting force on the ball, min	30.0 ± 1.0
The number of microorganisms in the studied semi-finished product	
Total	134x10 ⁶
Yeasts	58x10 ⁶
Bacteria	76x10 ⁶

Fig. 1. Changes in Free Amino Nitrogen and Reducing Sugars During Dough Fermentation



experiments were conducted using varying amounts of thick buckwheat probiotic sourdough during dough preparation. The results of these experiments, assessing the impact of sourdough quantity on bread quality indicators, are presented in Table 4.

The studies showed that increasing the sourdough quantity improved the physicochemical properties of the finished bread: moisture content decreased, and specific volume and crumb porosity increased. However, sensory qualities declined due to increased acidity in the crumb. The resulting whole wheat bread had a proper shape with a domed top crust, a smooth,

Table 4. Optimal Quantity of Thick Buckwheat Probiotic Sourdough

Bread Quality Indicator	Sourdough Amount (% of flour mass)				
	20	30	40	50	60
Taste	Characteristic bread flavor, slightly sweet		Characteristic, pronounced		Sour
Mass fraction of moisture, %	47.1	47.8	46.3	45.6	45.0
Acidity, degree	6.3	6.9	7.6	8.2	9.4
Porosity, %	48.0	49.4	51.8	51.9	52.0
Specific volume, cm ³ /g	1.48	1.50	1.51	1.52	1.53

glossy surface free of cracks, and a uniform crumb structure with medium and small pores. The bread had a characteristic aroma and flavor typical of whole grain bakery products. Thus, the study concluded that the optimal amount of thick buckwheat probiotic sourdough is 40% of the mass of dispersed wheat grain.

The antioxidant activity of the developed whole wheat bread using thick buckwheat probiotic sourdough was determined to be 28.8% DPPH radical inhibition, compared to 9.8% in control bread made according to GOST 31805.

The amino acid composition of the developed whole grain bread was also analyzed and is presented in Table 5.

The data show that the amino acid profile of the developed bread improved. The content of isoleucine and lysine increased, as did the combined total of cystine and methionine. The total amino acid content in the developed bread was 6.8% higher than in the control bread made according to GOST 31805.

To assess the microbial stability of the whole wheat bread made with thick buckwheat probiotic sourdough, the bread was cooled and stored under provoked conditions (temperature = 37 ± 1 °C, relative humidity = 90%) until signs of potato disease and mold appeared. Observations were conducted over 120 hours.

It was found that bread made with the developed sourdough was less susceptible to microbial spoilage compared to the control bread. The first signs of potato disease — characteristic odor and changes in crumb elasticity — appeared after 60 hours in the control sample. In contrast, the sourdough bread showed no signs of spoilage during the observation period.

Visible mold mycelium appeared on the surface of the control bread after 68–70 hours, while it appeared on the sourdough bread only after 98 hours — 28–30 hours later. This indicates that the use of thick buckwheat probiotic sourdough in whole grain bread technology helps prevent microbial spoilage of the final product.

The fermentative activity of the sourdough was also evaluated. The selected strains demonstrated high fermentative capacity, contributing to the development of desirable sensory properties in the final bread product. The optimal dosage of thick buckwheat probiotic sourdough was determined to be 40% of the mass of dispersed wheat grain.

Table 5. Amino Acid Composition of Whole Wheat Bread with Thick Buckwheat Probiotic Sourdough

Amino Acid, mg / 100 g	Grain wheat bread according to GOST 31805	Grain wheat bread with buckwheat probiotic thick Sourdough
Aspartic acid	418	667
Glutamic acid	2118	2076
Serine	296	356
Histidine	205	221
Glycine	386	411
Threonine	224	310
Arginine	436	536
Alanine	292	398
Tyrosine	146	177
Cystine + Methionine	268	297
Valine	411	398
Phenylalanine	428	427
Isoleucine	253	289
Leucine	538	517
Lysine	243	318
Proline	842	649
The sum of amino acids	7504	8047

This proportion provided the best balance between fermentation efficiency and bread quality. Bread produced with the developed sourdough showed improved antioxidant activity and a more balanced amino acid profile compared to control samples. The inclusion of buckwheat-based sourdough enhanced the nutritional value of the bread, making it a functional food product suitable for health-conscious consumers.

Conclusions /Выводы

An innovative sourdough starter was developed using whole-milled buckwheat flour and pure probiotic strains: lactic acid bacteria *Streptococcus thermophilus* TC 14, *Lactobacillus acidophilus* AP A97, *Lactobacillus brevis*-B78, and yeast *Saccharomyces boulardii* VKPM-Y-3925. It was established that the starter strains of microorganisms grew best in a fermentation medium made from the Bashkir krasnostebel'naya buckwheat variety.

Antagonistic activity was observed in the studied strains of lactic acid bacteria and yeast against the spore-forming bacterium *Bacillus subtilis* VKM-B-501 and mold strains *Aspergillus flavus* VKM-F-1024, *Aspergillus candidus* VKM-F-3908, *Penicillium crustosum* VKM-F-4080, *Penicillium expansion* VKM-F-275, *Mucor mucedo* VKM-F-1257, *Mucor racemosus* var. *sphaerosporus* VKM-F-541, and *Rhizopus stolonifer* (syn. *Rhizopus nigricans*) VKM-F-2005.

The characteristics of the resulting thick buckwheat probiotic sourdough demonstrated high fermentative activity and suitability for baking applications. Trial baking experiments determined that the optimal amount of thick buckwheat probiotic sourdough is 40% of the mass of dispersed wheat grain.

Incorporating the optimal dosage of the developed innovative sourdough into whole wheat

bread technology resulted in bread with enhanced antioxidant activity and a more balanced amino acid profile. The use of this sourdough technology helps prevent microbial spoilage of the finished product.

The author is responsible for the work and the presented data.

The author contributed 100% to the work.

The author participated in writing the manuscript and is responsible for plagiarism.

The author declared no conflict of interest.

FUNDING

The authors express their gratitude to the Russian Science Foundation (RSF) for financial support of the research conducted within the framework of grant No. 24-26-00259.

REFERENCES

1. Akamine I.T., Mansoldo F.R.P., Vermelho A.B. Probiotics in the Sourdough Bread Fermentation: Current Status. *Fermentation*. 2023; 9(2): 90. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020090>
2. Pejcz E., Lachowicz-Wisniewska S., Nowicka P., Wojciechowicz-Budzisz A., Harasym J. Enhancing Bread's Benefits: Investigating the Influence of Boosted Native Sourdough on FODMAP Modulation and Antioxidant Potential in Wheat Bread. *Foods*. 2023; 12(19): 3552. <https://doi.org/10.3390/foods12193552>
3. Ma S. *et al.* Sourdough improves the quality of whole-wheat flour products: Mechanisms and challenges — A review. *Food Chemistry*. 2021; 360: 130038. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130038>
4. Gänzle M.G., Zheng J. Lifestyles of sourdough lactobacilli — Do they matter for microbial ecology and bread quality?. *International Journal of Food Microbiology*. 2019; 302: 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019>
5. Kitaevskaya S.V., Kamartdinova D.R., Romanova N.K., Reshetnik O.A. The effect of starter cultures of lactic acid bacteria on the quality of grain bread. *Fundamental aspects and practical issues of modern microbiology and biotechnology. Materials of the National Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 70th anniversary of the birth of the Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honored Worker of Science and Technology of the Ulyanovsk region, Doctor of Biological Sciences, Professor D.A. Vasiliev. Ulyanovsk: P.A. Stolypin Ulyanovsk State Agrarian University*. 2022; 290–297 (in Russian). <https://elibrary.ru/slgqsc>
6. Chertkova A.D. Increasing resistance to microbiological spoilage of wheat bread using a lactic acid starter culture based on *Lactobacillus Brevis-78*. *Multipolar World in Focus of the New Reality. Proceedings of the XIII Eurasian economic youth forum*. Yekaterinburg: Ural State University of Economics. 2023; 3: 33–35 (in Russian). <https://elibrary.ru/muthwl>
7. Nektarevskaya A.D., Bortnikova E.V., Morgul E.V., Belik S.N., Kryuchkova V.V., Kontareva V.Yu. Biological effects of pro- and prebiotics in functional foods. *Development of animal husbandry, modern food production technologies, industrial and hygienic health safety. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Persianovsky: Don State Agrarian University. 2023; 1: 38–43 (in Russian). <https://elibrary.ru/jmwyprx>
8. Losevskaya S.A., Bazilevskaya A.A. Probiotics and prebiotics and their significance in food biotechnology. *Current Aspects of the Development of Science and Society in the Era of Digital Transformation. Collection of materials from the XX International scientific and practical conference*. Moscow: Center for the Development of Education and Science. 2025; 174–177 (in Russian). <https://elibrary.ru/xdmlws>
9. Lawrence Yu., Reznichenko I.Yu., Miroshina T.A. Characteristics of prebiotics and probiotics as functional products and ingredients. *Modern technologies in agricultural production and education. Proceedings of the XV International scientific and practical conference in foreign languages*. Kemerovo: Kuzbass State Agricultural University. 2024; 234–236. <https://elibrary.ru/gupfgb>
10. Oliveira R.P.S. *et al.* Effect of different prebiotics on the fermentation kinetics, probiotic survival and fatty acids profiles in nonfat symbiotic fermented milk. *International Journal of Food Microbiology*. 2009; 128(3): 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.10.012>

The proposed technological solutions will expand the range of whole grain bakery products with increased nutritional value, suitable for functional nutrition applications.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.

Автор внес вклад в работу 100%.

Автор принимал участие в написании рукописи и несет ответственность за плагиат.

Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследований, проведенных в рамках выполнения гранта № 24-26-00259.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Akamine I.T., Mansoldo F.R.P., Vermelho A.B. Probiotics in the Sourdough Bread Fermentation: Current Status. *Fermentation*. 2023; 9(2): 90. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020090>
2. Pejcz E., Lachowicz-Wisniewska S., Nowicka P., Wojciechowicz-Budzisz A., Harasym J. Enhancing Bread's Benefits: Investigating the Influence of Boosted Native Sourdough on FODMAP Modulation and Antioxidant Potential in Wheat Bread. *Foods*. 2023; 12(19): 3552. <https://doi.org/10.3390/foods12193552>
3. Ma S. *et al.* Sourdough improves the quality of whole-wheat flour products: Mechanisms and challenges — A review. *Food Chemistry*. 2021; 360: 130038. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130038>
4. Gänzle M.G., Zheng J. Lifestyles of sourdough lactobacilli — Do they matter for microbial ecology and bread quality?. *International Journal of Food Microbiology*. 2019; 302: 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019>
5. Китаевская С.В., Камартдинова Д.Р., Романова Н.К., Решетник О.А. Влияние заквасок молочнокислых бактерий на качественные характеристики зернового хлеба. *Фундаментальные аспекты и практические вопросы современной микробиологии и биотехнологии. Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию со дня рождения почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженного деятеля науки и техники Ульяновской области доктора биологических наук, профессора Д.А. Васильева. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина*. 2022; 290–297. <https://elibrary.ru/slgqsc>
6. Черткова А.Д. Повышение устойчивости к микробиологической порче пшеничного хлеба с применением молочнокислой закваски на основе *Lactobacillus Brevis-78*. *Многополярный мир в фокусе новой действительности. Материалы XIII Евразийского экономического форума молодежи*. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет. 2023; 3: 33–35. <https://elibrary.ru/muthwl>
7. Нектаревская А.Д., Бортникова Е.В., Моргуль Е.В., Белик С.Н., Крючкова В.В., Контарева В.Ю. Биологические эффекты про- и пребиотиков в функциональных продуктах питания. *Развитие животноводства, современные технологии производства продуктов питания, производственная и гигиеническая безопасность здоровья. Материалы Международной научно-практической конференции*. Персиановский: Донской государственный аграрный университет. 2023; 1: 38–43. <https://elibrary.ru/jmwyprx>
8. Лосевская С.А., Базилевская А.А. Пробиотики и пребиотики и их значение в пищевой биотехнологии. *Актуальные аспекты развития науки и общества в эпоху цифровой трансформации. Сборник материалов XX Международной научно-практической конференции*. М.: Центр развития образования и науки. 2025; 174–177. <https://elibrary.ru/xdmlws>
9. Лоуренс Ю., Резниченко И.Ю., Мирошина Т.А. Характеристика пребиотиков и пробиотиков как продуктов и ингредиентов функционального назначения. *Современные технологии в сфере сельскохозяйственного производства и образования. Материалы XV Международной научно-практической конференции на иностранных языках*. Кемерово: Кузбасский ГАУ. 2024; 234–236 (на англ. яз.). <https://elibrary.ru/gupfgb>
10. Oliveira R.P.S. *et al.* Effect of different prebiotics on the fermentation kinetics, probiotic survival and fatty acids profiles in nonfat symbiotic fermented milk. *International Journal of Food Microbiology*. 2009; 128(3): 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.10.012>

11. Qin P., Wu L., Yao Y., Ren G. Changes in phytochemical compositions, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities during the processing of tartary buckwheat tea. *Food Research International*. 2013; 50(2): 562–567. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.028>
12. Coman M.M. *et al.* Effect of buckwheat flour and oat bran on growth and cell viability of the probiotic strains *Lactobacillus rhamnosus* IMC 501[®], *Lactobacillus paracasei* IMC 502[®] and their combination SYNBO[®], in synbiotic fermented milk. *International Journal of Food Microbiology*. 2013; 167(2): 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.09.015>
13. Christa K., Soral-Šmietana M. Buckwheat grains and buckwheat products — nutritional and prophylactic value of their components — a review. *Czech Journal of Food Sciences*. 2008; 26(3): 153–162. <https://doi.org/10.17221/1602-CJFS>
14. Zhanel A., Iskakova G.K., Izembayeva A.K., Baiysbayeva M.P. A Rationale for the use of buckwheat and corn flour in the technology of gluten-free pasta. *Agrarian science*. 2023; (5): 93–97 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-370-5-93-97>
15. Kuznetsova E.A., Rebezov M.B., Kuznetsova E.A. Biochemical indicators of the composition and properties of *Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn. grain and changes in some of them during enzymatic hydrolysis. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25(9): 1395–1405. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-09-1395-1405>
16. Lee H.-S., Kim M.-K. Growth Responses of Grain Extracts on Human Intestinal Bacteria. *Food Science and Biotechnology*. 2000; 9(6): 387–390.
17. Ugural A., Akyol A. Can pseudocereals modulate microbiota by functioning as probiotics or prebiotics? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020; 62(7): 1725–1739. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1846493>
18. Wronkowska M., Jeliński T., Majkowska A., Zieliński H. Physical Properties of Buckwheat Water Biscuits Formulated from Fermented Flours by Selected Lactic Acid Bacteria. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2018; 68(1): 25–31. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2017-0027>
19. Kowalska E., Ziarno M. The Possibility of Obtaining Buckwheat Beverages Fermented with Lactic Acid Bacteria and Bifidobacteria. Ziarno M. (ed.). *Milk Substitutes — Selected Aspects. IntechOpen*. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94913>
20. Fogacci F., Borghi C., Cicero A.F.G. Functional Foods and Nutraceuticals to Reduce the Risk of Cardiometabolic Disease: Where We Are, and Where We Are Going. *Nutrients*. 2024; 16(18): 3152. <https://doi.org/10.3390/nu16183152>
21. Trimarco B., Santulli G. Dietary Supplements in Cardiovascular and Metabolic Diseases. *Nutrients*. 2024; 16(10): 1418. <https://doi.org/10.3390/nu16101418>
22. Clark C.S. *et al.* Sourdough starter culture microbiomes influence physical and chemical properties of wheat bread. *Journal of Food Science*. 2024; 89(3): 1414–1427. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16957>
23. Hernández-Velázquez R. *et al.* The future is fermented: Microbial biodiversity of fermented foods is a critical resource for food innovation and human health. *Trends in Food Science & Technology*. 2024; 150: 104569. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104569>
24. Lokachuk M.N., Savkina O.A. Development of a method for simultaneous counting of lactic acid and propionic acid bacteria in sourdough. *Actual Problems of Biodiversity and Biotechnology. Proceedings of the IV International scientific and practical conference*. Astrakhan: Astrakhan Tatishchev State University. 2025; 71–74 (in Russian). <https://elibrary.ru/hcnfms>
25. Fernández-Peláez J., Paesani C., Gómez M. Sourdough Technology as a Tool for the Development of Healthier Grain-Based Products: An Update. *Agronomy*. 2020; 10(12): 1962. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121962>
26. Gupta R.K., Gangoliya S.S., Singh N.K. Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of Food Science and Technology*. 2015; 52(2): 676–684. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0978-y>
27. Abbondio M. *et al.* Fecal Metaproteomic Analysis Reveals Unique Changes of the Gut Microbiome Functions After Consumption of Sourdough Carasau Bread. *Frontiers in Microbiology*. 2019; 10: 1733. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01733>
28. Moroni A.V., Zannini E., Sensidoni G., Arendt E.K. Exploitation of buckwheat sourdough for the production of wheat bread. *European Food Research and Technology*. 2012; 235(4): 659–668. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1790-z>
11. Qin P., Wu L., Yao Y., Ren G. Changes in phytochemical compositions, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities during the processing of tartary buckwheat tea. *Food Research International*. 2013; 50(2): 562–567. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.028>
12. Coman M.M. *et al.* Effect of buckwheat flour and oat bran on growth and cell viability of the probiotic strains *Lactobacillus rhamnosus* IMC 501[®], *Lactobacillus paracasei* IMC 502[®] and their combination SYNBO[®], in synbiotic fermented milk. *International Journal of Food Microbiology*. 2013; 167(2): 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.09.015>
13. Christa K., Soral-Šmietana M. Buckwheat grains and buckwheat products — nutritional and prophylactic value of their components — a review. *Czech Journal of Food Sciences*. 2008; 26(3): 153–162. <https://doi.org/10.17221/1602-CJFS>
14. Жамел А., Исакова Г.К., Изембаева А.К., Байысбаева М.П. Обоснование использования гречневой и кукурузной муки в технологии безглютеновых макаронных изделий. *Аграрная наука*. 2023; (5): 93–97. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-370-5-93-97>
15. Кузнецова Е.А., Ребезов М.Б., Кузнецова Е.А. Биохимические показатели состава и свойств зерна *Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn. и изменение некоторых из них при ферментативном гидролизе. *Аграрный вестник Урала*. 2025; 25(9): 1395–1405 (на англ. яз.). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-09-1395-1405>
16. Lee H.-S., Kim M.-K. Growth Responses of Grain Extracts on Human Intestinal Bacteria. *Food Science and Biotechnology*. 2000; 9(6): 387–390.
17. Ugural A., Akyol A. Can pseudocereals modulate microbiota by functioning as probiotics or prebiotics? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020; 62(7): 1725–1739. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1846493>
18. Wronkowska M., Jeliński T., Majkowska A., Zieliński H. Physical Properties of Buckwheat Water Biscuits Formulated from Fermented Flours by Selected Lactic Acid Bacteria. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2018; 68(1): 25–31. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2017-0027>
19. Kowalska E., Ziarno M. The Possibility of Obtaining Buckwheat Beverages Fermented with Lactic Acid Bacteria and Bifidobacteria. Ziarno M. (ed.). *Milk Substitutes — Selected Aspects. IntechOpen*. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94913>
20. Fogacci F., Borghi C., Cicero A.F.G. Functional Foods and Nutraceuticals to Reduce the Risk of Cardiometabolic Disease: Where We Are, and Where We Are Going. *Nutrients*. 2024; 16(18): 3152. <https://doi.org/10.3390/nu16183152>
21. Trimarco B., Santulli G. Dietary Supplements in Cardiovascular and Metabolic Diseases. *Nutrients*. 2024; 16(10): 1418. <https://doi.org/10.3390/nu16101418>
22. Clark C.S. *et al.* Sourdough starter culture microbiomes influence physical and chemical properties of wheat bread. *Journal of Food Science*. 2024; 89(3): 1414–1427. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16957>
23. Hernández-Velázquez R. *et al.* The future is fermented: Microbial biodiversity of fermented foods is a critical resource for food innovation and human health. *Trends in Food Science & Technology*. 2024; 150: 104569. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104569>
24. Локачук М.Н., Савкина О.А. Разработка метода одновременного учета молочнокислых и пропионовых бактерий в хлебопекарных заквасках. *Актуальные проблемы биоразнообразия и биотехнологии. Материалы IV Международной научно-практической конференции*. Астрахань: Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева. 2025; 71–74. <https://elibrary.ru/hcnfms>
25. Fernández-Peláez J., Paesani C., Gómez M. Sourdough Technology as a Tool for the Development of Healthier Grain-Based Products: An Update. *Agronomy*. 2020; 10(12): 1962. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121962>
26. Gupta R.K., Gangoliya S.S., Singh N.K. Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of Food Science and Technology*. 2015; 52(2): 676–684. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0978-y>
27. Abbondio M. *et al.* Fecal Metaproteomic Analysis Reveals Unique Changes of the Gut Microbiome Functions After Consumption of Sourdough Carasau Bread. *Frontiers in Microbiology*. 2019; 10: 1733. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01733>
28. Moroni A.V., Zannini E., Sensidoni G., Arendt E.K. Exploitation of buckwheat sourdough for the production of wheat bread. *European Food Research and Technology*. 2012; 235(4): 659–668. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1790-z>

29. Rustemova A.Zh., Rebezov M.B. Leguminous mixture as a promising raw material source in bakery technology. *Agrarian science*. 2023; (6): 121–125 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-81552023-371-6-121-125>
30. Rustemova A.Zh., Rebezov M.B. The use of leguminous mixture for bakery products. *Agrarian science*. 2023; (8): 137–142 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-137-142>
31. Silva B.A., Ferreres F., Malva J.O., Dias A.C.P. Phytochemical and antioxidant characterization of *Hypericum perforatum* alcoholic extracts. *Food Chemistry*. 2005; 90(1–2): 157–167. <https://dx.doi.org/doi:10.1016/j.foodchem.2004.03.049>
32. Pereira D.I.A., McCartney A.L., Gibson G.R. An in Vitro Study of the Probiotic Potential of a Bile-Salt-Hydrolyzing *Lactobacillus fermentum* Strain, and Determination of Its Cholesterol-Lowering Properties. *Applied and Environmental Microbiology*. 2003; 69(8): 4743–4752. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.8.4743-4752.2003>
33. Venturi M., Guerrini S., Granchi L., Vincenzini M. Typing of *Lactobacillus sanfranciscensis* isolates from traditional sourdoughs by combining conventional and multiplex RAPD-PCR profiles. *International Journal of Food Microbiology*. 2012; 156(2): 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.03.011>
34. Battcock M., Azam-Ali S. Fermented fruits and vegetables: A global perspective. FAO Agricultural Services Bulletin No. 134. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1998; 96. ISBN 92-5-104226-8

ОБ АВТОРАХ

Елена Анатольевна Кузнецова^{1,2}

- доктор технических наук, доцент, завкафедрой промышленной химии и биотехнологии¹
 - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии общественного питания и переработки растительного сырья²
- elkuznetcova@yandex.ru
<https://orcid.org/00000-0001-7165-3517>

Максим Борисович Ребезов^{3,4}

- доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник³
 - доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов⁴
- rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Николай Ильич Бондарев¹

доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры промышленной химии и биотехнологии
nik.in@list.ru
<https://orcid.org/0009-0001-1198-0345>

Даваасурен Лхагвадолгор⁵

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии
lkhagvadolgorg@stda.edu.mn
<https://orcid.org/0009-0005-3640-2188>

¹Орловский государственный университет
 им. И.С. Тургенева,
 ул. Комсомольская, 95, Орёл, 302026, Россия

²Башкирский государственный аграрный университет,
 ул. 50-летия Октября, 34, Уфа, 450001, Россия

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

⁴Уральский государственный аграрный университет,
 ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

⁵Монгольский университет науки и технологий,
 Школа технологии в Дархане,
 8-я улица Бага Тойруу, 34, Улан-Батор, 46/520, Монголия

29. Рустемова А.Ж., Ребезов М.Б. Зернобобовая смесь как перспективный сырьевой источник в технологии хлебопечения. *Аграрная наука*. 2023; (6): 121–125. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-121-125>

30. Рустемова А.Ж., Ребезов М.Б. Применение зернобобовой смеси для хлебобулочных изделий. *Аграрная наука*. 2023; (8): 137–142. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-137-142>

31. Silva B.A., Ferreres F., Malva J.O., Dias A.C.P. Phytochemical and antioxidant characterization of *Hypericum perforatum* alcoholic extracts. *Food Chemistry*. 2005; 90(1–2): 157–167. <https://dx.doi.org/doi:10.1016/j.foodchem.2004.03.049>

32. Pereira D.I.A., McCartney A.L., Gibson G.R. An in Vitro Study of the Probiotic Potential of a Bile-Salt-Hydrolyzing *Lactobacillus fermentum* Strain, and Determination of Its Cholesterol-Lowering Properties. *Applied and Environmental Microbiology*. 2003; 69(8): 4743–4752. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.8.4743-4752.2003>

33. Venturi M., Guerrini S., Granchi L., Vincenzini M. Typing of *Lactobacillus sanfranciscensis* isolates from traditional sourdoughs by combining conventional and multiplex RAPD-PCR profiles. *International Journal of Food Microbiology*. 2012; 156(2): 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.03.011>

34. Battcock M., Azam-Ali S. Fermented fruits and vegetables: A global perspective. FAO Agricultural Services Bulletin No. 134. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1998; 96. ISBN 92-5-104226-8

ABOUT THE AUTHORS

Elena Anatolyevna Kuznetsova^{1,2}

- Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Chemistry and Biotechnology¹
 - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Public Catering Technology and Processing of Plant Raw Materials²
- elkuznetcova@yandex.ru
<https://orcid.org/00000-0001-7165-3517>

Maksim Borisovich Rebezov^{3,4}

- Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher³
 - Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products⁴
- rebezov@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

Nikolai Ilyich Bondarev¹

Doctor of biological sciences, Docent, Professor of the Department of Industrial Chemistry and Biotechnology
nik.in@list.ru
<https://orcid.org/0009-0001-1198-0345>

Davaasuren Lkhagvadolgorg⁵

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Technology
lkhagvadolgorg@stda.edu.mn
<https://orcid.org/0009-0005-3640-2188>

¹Orel State University named after
 I.S. Turgenev,
 95 Komsomolskaya Str., Orel, 302026, Russia

²Bashkir State Agrarian University,
 34 50-letiya Oktyabrya Str., Ufa, 450001, Russia

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

⁴Ural State Agrarian University,
 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, 620075, Russia

⁵Mongolian University of Science and Technology
 (School of Technology, Darkhan),
 34 8th Baga Toiruu Str., Ulaanbaatar, 46/520, Mongolia

УДК 614.31

Научный обзор



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186

А.А. Лукин^{1,2} ✉О.П. Кан³¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Челябинская обл., Россия²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия³Университет Сивас Джумхуриет, Сивас, Турция

✉ lukin3415@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Лукин А.А., Кан О.П.

Методы определения полициклических ароматических углеводородов в молоке и молочных продуктах

РЕЗЮМЕ

Научный обзор посвящен методам определения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в молоке и молочных продуктах. Основное внимание уделено точности, надежности и доступности используемых методик, обеспечивающих контроль качества пищевых продуктов. Рассматриваются разнообразные техники анализа, включая жидкостную и газовую хроматографию, спектроскопию и микрофлуоресценцию. Отмечается, что существующие технологии обеспечивают достаточную точность и воспроизводимость результатов, способствуя повышению безопасности молочных продуктов. Несмотря на сложность процедур, современная техника обеспечивает надежные результаты и способствует контролю качества продуктов питания. ПАУ классифицируются по молекулярной массе и происхождению, различаются по уровню токсичности и способности накапливаться в живых организмах. Подробно рассматриваются методы экстракции и очистки, включая жидкостную и газовую хроматографию, рамановскую микроскопию и инфракрасную спектроскопию. Приводятся международные рекомендации и ограничения на содержание ПАУ в пищевых продуктах, установленные Агентством по охране окружающей среды США и Европейским агентством по безопасности пищевых продуктов. Оцениваются перспективы использования различных методов анализа в реальных условиях, подчеркивая важность точного контроля содержания ПАУ в молочных продуктах. Научный обзор подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования методов анализа и контроля ПАУ, а также важность сотрудничества между молочной промышленностью и профессиональными лабораториями для минимизации риска загрязнений.

Ключевые слова: молоко, молочные продукты, полициклические ароматические углеводороды, окружающая среда, загрязнители, безопасность, токсичность

Для цитирования: Лукин А.А., Кан О.П. Методы определения полициклических ароматических углеводородов в молоке и молочных продуктах. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 167–186.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186>

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186

Aleksander A. Lukin^{1,2} ✉Özlem Pelin Can³¹South Ural State Agrarian University, Troitsk, Chelyabinsk region, Russia²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia³Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye

✉ lukin3415@gmail.com

Received by the editorial office: 01.10.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© © Lukin A.A., Can Ö.P.

Methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products

ABSTRACT

This scientific review is dedicated to analytical methods for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in milk and dairy products. The primary focus is placed on the accuracy, reliability, and accessibility of the methodologies employed for food quality control. A comprehensive examination of various analytical techniques is provided, including liquid and gas chromatography, spectroscopy, and micro-fluorescence. It is noted that existing technologies ensure sufficient accuracy and reproducibility of results, thereby enhancing the safety of dairy products. Despite the complexity of the procedures, modern instrumentation delivers reliable outcomes and supports effective food quality control. PAHs are classified based on their molecular weight and origin, differing in their toxicity levels and capacity for bioaccumulation in living organisms. The review offers a detailed assessment of extraction and purification methods, encompassing liquid and gas chromatography, Raman microscopy, and infrared spectroscopy. International guidelines and regulatory limits for PAH content in foodstuffs, as established by the US Environmental Protection Agency (EPA) and the European Food Safety Authority (EFSA), are presented. The prospects for the application of various analytical methods in real-world settings are evaluated, emphasizing the critical importance of precise monitoring of PAH levels in dairy products. This review underscores the necessity for the continued refinement of PAH analysis and control methods, as well as the significance of collaboration between the dairy industry and specialized laboratories to minimize contamination risks.

Key words: milk, dairy products, polycyclic aromatic hydrocarbons, environment, pollutants, safety, toxicity

For citation: Lukin A.A., Can Ö.P. Methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 167–186 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-167-186>

Введение/Introduction

Многочисленные исследования подтвердили положительное влияние коровьего молока на здоровье [1–4], особенно в детском возрасте, когда активно формируется костная система [5, 6]. Кальций и фосфор, содержащиеся в молоке [7], играют важную роль в профилактике остеопороза у пожилых людей [8, 9]. Кроме того, регулярное потребление молока и молочных продуктов может помочь уменьшить слабость и саркопению в этой возрастной группе. Молочные продукты богаты биоактивными пептидами, которые высвобождаются в процессе пищеварения и ферментации, что может принести дополнительные преимущества для здоровья [10, 11].

Молочный жир служит носителем жирорастворимых витаминов (A, D, E и K), значительно увеличивает калорийность (9 ккал/г жира) [12–14] и содержит незаменимые жирные кислоты, такие как конъюгированная линолевая кислота (CLA).

Молоко является ценным источником водорастворимых витаминов, таких как B_1 , B_2 , B_{12} , A и пантотеновая кислота, в количествах, которые делают его отличным диетическим выбором для удовлетворения значительной части ежедневных потребностей в питательных веществах [15].

Молоко других животных, таких как верблюды, яки, козы и овцы, обладает полезными свойствами для здоровья человека, и в некоторых регионах его популярность даже превышает популярность коровьего молока [16–19]. Например, козье и верблюжье молоко часто используется в диетической терапии для детей с аллергией на белки коровьего молока [20].

Люди начали употреблять молоко различных видов животных более 8000 лет назад, что сделало его важным источником питания на протяжении всей жизни. Коровье молоко, наиболее распространенное и производимое в промышленных масштабах [21], остается основным продуктом питания [22, 23], несмотря на продолжающиеся споры о его пользе. Многочисленные исследования подтверждают его значительные преимущества для здоровья [24–28].

В 2023–2024 годах мировое производство молока достигло 659,25 млн т и, по прогнозам, выросло на 1% до 667,49 млн т в 2024–2025 гг. [29]. Среднегодовой темп роста за последние 10 лет составил 2%. Индия является крупнейшим производителем с объемом производства, превышающим 200 млн т в 2024 году, за ней следуют Европейский союз (почти 150 млн т) и США (чуть более 100 млн т). Во многих регионах, молоко является основой рациона благодаря содержащимся в нем легкоусвояемым белкам и липидам [30–34].

С ростом рынка молочных продуктов увеличиваются и опасения по поводу загрязнения

окружающей среды, последствий переработки, а также наличия вредных веществ в молоке и молочных изделиях [35–39]. К таким веществам относятся ПАУ, которые классифицируются как мутагенные и канцерогенные. Контроль уровня ПАУ в молоке и молочных продуктах является крайне важным. Эти соединения накапливаются в окружающей среде и попадают в молоко через загрязненные корма. Кроме того, высокотемпературная обработка молока может способствовать дополнительному образованию ПАУ.

С учетом широкого потребления ПАУ у уязвимых групп, таких как дети и пожилые люди, контроль этих веществ в молоке становится крайне важным. Обнаружение ПАУ, как в качественном, так и в количественном измерении представляет собой сложную задачу, требующую разработки более эффективных и быстрых методов. Современные методы обнаружения позволят более точно контролировать уровни ПАУ на всех этапах производственного процесса [40–44].

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 2001 по 2025 год включительно.

Поиск потенциально релевантных статей проводили по ключевым словам в электронных базах данных Scopus¹, Sci-Hub² и e.Library.Ru³ и поисковой системы Google Академия⁴.

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

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Молоко представляет собой сложную матрицу. Гидрофобные ПАУ имеют склонность накапливаться в жирах, особенно в мембранах мицелл казеина, что усложняет их извлечение для анализа по сравнению с другими пищевыми матрицами. Аналитические методы определения ПАУ, как правило, основаны на хроматографии и требуют тщательной очистки образцов, чтобы избежать искажения результатов. Процесс очистки может включать традиционную экстракцию «жидкость — жидкость» или более современные методы, такие как твердофазная экстракция. Наиболее

¹ <https://sci-hub.ru/>

² <https://sci-hub.ru/>

³ <https://elibrary.ru/>

⁴ <https://scholar.google.com/?hl=ru>

распространенными методами являются жидкостная хроматография (рис. 1) с флуоресцентным детектором и газовая хроматография (рис. 2) с масс-спектрометрией.

ПАУ являются загрязнителями окружающей среды и широко распространены в природе (табл. 1). Они образуются в результате неполного сгорания органических веществ, поступая в окружающую среду двумя основными путями: через естественные процессы, такие как вулканические извержения, лесные пожары и биологическая активность (классифицируемая как пирогенная или петрогенная), а также в результате антропогенной деятельности, включая производство энергии, сельское хозяйство и промышленную переработку.

В научной литературе эти вещества также называют полициклическими органическими веществами (ПОМ), многоядерными ароматическими углеводородами (ПАУ), многоядерными ароматическими соединениями (ПНАС) или многоядерными углеводородами. Выявлены более 200 различных соединений, из которых более дюжины были отнесены Европейским союзом и США к категории веществ, требующих особого внимания из-за их токсичности. Эти соединения редко встречаются в природе в чистом виде. Чаще они образуют сложные смеси [45–48].

Некоторые ПАУ, такие как бензо[а]антрацен, хризен, бензо[б]флуорантен и бензо[а]пирен, используются в качестве маркерных соединений в тестах для оценки уровней загрязнения в образцах [49].

Структурно ПАУ состоят из двух или более связанных ароматических колец, состоящих из атомов углерода и водорода. Их можно классифицировать по различным критериям, включая молекулярный вес: ПАУ с низкой молекулярной

массой (LMW-ПАУ) содержат два или три ароматических кольца, тогда как ПАУ с высокой молекулярной массой (HMW-ПАУ) имеют четыре или более колец. Кроме того, ПАУ делятся на альтернантные (состоящие исключительно из шестиуглеродных бензольных колец) и неальтернантные (включающие шестиуглеродные бензольные кольца, соединенные с кольцами, содержащими менее шести атомов углерода) [50].

Существует стандартная классификация ПАУ, основанная на их происхождении, которая делит их на петрогенные и пирогенные. Первая категория связана с нефтяной промышленностью и другими нефтепродуктами. ПАУ, образующиеся из нефти, имеют низкую молекулярную массу и содержат два или три кольца. Вторая категория возникает в результате неполного сгорания. При сгорании тепло расщепляет органические молекулы,

Рис. 1. Схема жидкостной хроматографии

Fig. 1. Liquid chromatography diagram



Рис. 2. Схема газовой хроматографии

Fig. 2. Gas chromatography diagram

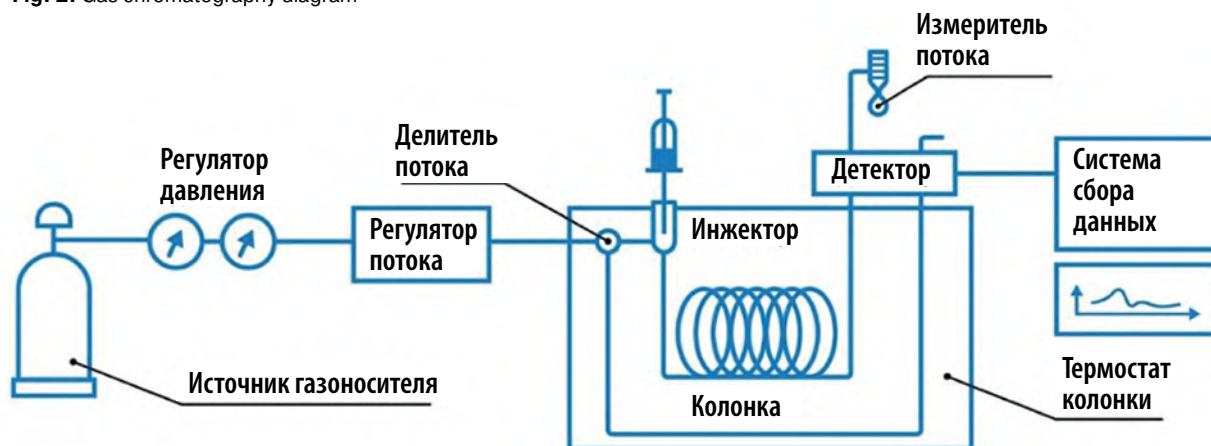
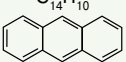
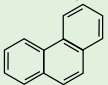
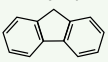
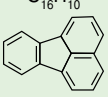
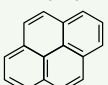
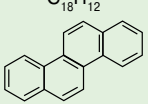
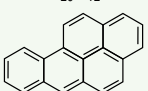
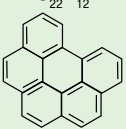
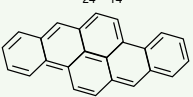
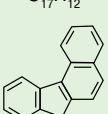


Таблица 1. Характеристики некоторых ПАУ

Table 1. Characteristics of some PAHs

ПАУ	Химическая формула	Влияние на здоровье человека и живых организмов
Нафталин (бицикло-[4.4.0]-дека-1,3,5,7,9-пентаен, гексален, антими́т)	$C_{10}H_8$ 	Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицировало нафталин как возможный канцероген людей и животных (Group 2B). В человеческом организме чаще всего концентрируется в жировой ткани, где может накапливаться до тех пор, пока жировая ткань не начнет сжигаться и данное вещество (нафталин) не попадет в кровь, после чего наступает отравление организма (кровотечение, возникновение опухолей и т. д.).
Аценафтилен (трицикло-[6.3.1.0 ^{4,12}]-додека-1(12), 2,4,6,8,10-гексаен)	$C_{12}H_8$ 	По степени токсичности соответствует нафталину.
Антрацен (трицикло-[8.4.0.0 ^{3,8}]-тетрадека-1,3,5,7,9,11,13-гептаен)	$C_{14}H_{10}$ 	IARC относит антрацен к группе 2B, возможно, канцерогенным для человека.
Фенантрен (трицикло-[8.4.0.0 ^{2,7}]-тетрадека-1,3,5,7,9,11,13-гептаен)	$C_{14}H_{10}$ 	Фенантрен, содержащийся в сигаретном дыме, может разрушать ДНК после попадания в кровь. По степени токсичности соответствует нафталину.
Флуорен (о,о'-дифениленметан, трицикло-[7.4.0.0 ^{2,7}]-тридека-2,4,6,9,11,13-гексаен)	$C_{13}H_{10}$ 	Исследования показали, что высокие дозы флуорена значительно замедляют рост <i>E. fetida</i> (дождевые черви), что приводит к нарушениям нормального развития. Кроме того, воздействие флуорена вызывало аномальную экспрессию мРНК, связанной с окислительным стрессом (например, металлотионеин и белок теплового шока 70), а также с процессами роста (контролируемыми на уровне трансляции опухолевым белком) и размножения (предшественником аннотацина) у <i>E. Fetida</i> .
Флуорантен (бензофлуорен, тетрацикло-[7.6.1.0 ^{5,10} .16.0 ^{10,15}]-гексадека-1,3,5,7,9(16),10,12,14-октаен)	$C_{16}H_{10}$ 	Флуорантен был классифицирован IARC как канцероген группы 3, «не поддающийся классификации по своей канцерогенности для человека», однако было обнаружено, что он обладает канцерогенными свойствами у новорожденных мышей в соответствии с краткосрочным анализом опухоли легкого (Busby <i>et al.</i> , 1984).
Пирен (бензо[def] фенантрен)	$C_{16}H_{10}$ 	Хотя он не так опасен, как бензопирен, исследования на животных показали, что пирен токсичен для почек и печени.
Хризен (1,2-бензофенантрен)	$C_{18}H_{12}$ 	Как и в случае с другими ПАУ, считается, что хризен является канцерогеном для человека. Некоторые данные свидетельствуют о том, что он вызывает рак у лабораторных животных, но хризен часто загрязнен более сильнодействующими канцерогенными соединениями. Считается, что токсичность хризена составляет около 1% от токсичности бензо(а)пирена.
Бензо[а]пирен (пентацикло-[10.6.2.0 ^{2,7} .0 ^{9,19} .0 ^{16,20}]-икоса-1,3,5,7,9,11,13,15,17,19-декаен)	$C_{20}H_{12}$ 	В 2012 году IARC отнесло бензопирен к группе канцерогенных для человека веществ (группа 1). Механизм действия бензопирена состоит в его превращении в процессе метаболизма в химически активные вещества, образующие ковалентные связи с ДНК. Эти ДНК-аддукты индуцируют мутации в онкогене K-RAS и гене-супрессоре опухолей TP53 в опухолях легких человека и соответствующих генах опухолей легких мыши. Непосредственное воздействие бензопирена и содержащих его смесей вызывает и другие генетические повреждения.
Бензо[ghi]перилен (6,7-этенперилен)	$C_{22}H_{12}$ 	Он является продуктом неполного сгорания и содержится в табачном дыме, автомобильных выхлопах, промышленных выбросах, мясных продуктах, приготовленных на гриле, и пищевых маслах. Это соединение сильно накапливается в организмах и окружающей среде и предположительно является мутагенным и канцерогенным.
Дибензо[а,h]пирен (3,4-9,10-дибензопирен)	$C_{24}H_{14}$ 	Вызывает рак легких.
Бензо(с)флуорен (тетрацикло-[8.7.0.0 ^{2,7} .0 ^{12,17}]-гептадека-1,3,5,7,9,12,14,16-октаен)	$C_{17}H_{12}$ 	Карциногенные метаболиты бензо[с]флуорена связываются с ДНК, что приводит к раскрытию эпоксидного кольца в бензо[с]флуореновом анти- и син-диолопоксида. Метаболиты бензо[с]флуорена связываются с ДНК еще неизвестным образом. Когда аддукт ДНК образуется в месте, критически важном для регуляции дифференцировки или роста клеток, он может вызвать рак. Кроме того, известно, что больше всего страдают клетки с быстрой репликацией, такие как костный мозг, кожа и легочная ткань, в то время как ткани с более медленным обменом веществ, такие как печень, менее восприимчивы. Воздействие бензо[с]флуорена <i>in vivo</i> приводит к развитию в основном опухолей легких, где он действует как аддуктор ДНК.

образуя воду и углекислый газ. Однако неполное сгорание приводит к образованию большого количества второстепенных органических соединений, которые затем рекомбинируют в новые вещества, включая ПАУ. Эта группа в основном включает ПАУ, которые могут образовываться при обработке пищевых продуктов. Большинство пирогенных источников ПАУ представляют собой сложные соединения, состоящие преимущественно из четырех, пяти и шести колец [51].

ПАУ имеют бесцветный или бледно-желтый цвет. Их молекулы состоят из атомов углерода и водорода, формирующих бензольные кольца (не менее двух), которые могут соединяться в линейные, кластерные или угловые структуры. Из-за своей сложной структуры и относительно высокого молекулярного веса ПАУ обладают низкой летучестью и остаются твердыми при комнатной температуре. Широкое распространение ПАУ приводит к тому, что люди подвергаются их воздействию различными способами: через кожу и при вдыхании или проглатывании. По данным T. Rengarajan, более 70% некурящих людей сталкиваются с ПАУ из-за употребления загрязненных продуктов [52]. F. Shoaee и коллеги предполагают, что этот показатель может достигать 88–98% [53].

LMW-ПАУ представляют собой летучие соединения с относительно низкой токсичностью. В отличие от них, HMW-ПАУ обладают большей стабильностью и более высокой токсичностью, что связано с их устойчивостью к нуклеофильным атакам, обусловленной плотными π -электронами в ароматических кольцах. С увеличением молекулярной массы растворимость в воде снижается, в то время как температуры плавления и кипения возрастают из-за увеличенной липофильности. Эта повышенная липофильность способствует биоаккумуляции данных соединений в живых организмах [54–58].

ПАУ являются неполярными и липофильными веществами, что позволяет им легко растворяться в жирах и связываться с клеточными мембранами, нарушая их структуру и функции. Наиболее опасные ПАУ, содержащиеся в пищевых продуктах, обычно имеют от 2 до 7 ароматических колец. Среди них бензо[а]пирен выделяется своей высокой жирорастворимостью, что позволяет ему связываться с хиломикронами и липопротеинами. Это способствует его проникновению в системы всасывания и распределения липидов, что в свою очередь приводит к биоаккумуляции в печени и тонком кишечнике — ключевых органах этих процессов. Накопление бензо[а]пирена в жировых тканях вызывает опасения, что воздействие ПАУ и образование аддуктов ПАУ-ДНК могут повышать риск рака груди. Однако доказательства этой связи остаются неубедительными из-за сложности взаимодействий. Дети могут быть подвержены риску развития рака, согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), который может быть связан с воздействием ПАУ. Важно

отметить, что современные исследования фокусируются на ПАУ, содержащихся как в продуктах питания, так и в окружающей среде [59–63].

ПАУ на здоровье человека зависит от типа воздействия, концентрации и относительной токсичности этих веществ. Многие из них признаны канцерогенными, мутагенными и тератогенными. Бензо[а]пирен, который считается высокоактивным канцерогеном, был классифицирован Международным агентством по изучению рака (IARC) как канцероген группы 1. Это соединение широко используется в качестве маркера для оценки уровней загрязнения ПАУ и в клинических исследованиях, изучающих связь между ПАУ и различными заболеваниями [64, 65].

Бензо[а]пирен образует метаболиты, способные формировать ДНК-аддукты и вызывать хромосомные aberrации. Если повреждения ДНК не будут эффективно устранены до репликации, это может привести к мутациям и разрывам нитей ДНК [44]. Кроме того, бензо[а]пирен вызывает окислительный стресс, хроническое воспаление и воспалительные каскады, которые все связаны с развитием рака через негенотоксические механизмы.

ПАУ могут вызывать негенотоксические эффекты. Они способствуют высвобождению провоспалительных цитокинов, что приводит к воспалению и изменению структуры сосудов. Эти процессы могут ускорить прогрессирование и нестабильность атеросклеротических бляшек, что в свою очередь способствует развитию атеросклероза. Воздействие ПАУ может увеличить риск сердечно-сосудистых заболеваний, таких как атеросклероз, гипертония, тромбоз и инфаркт миокарда. ВОЗ связывает ПАУ с проблемами нейроразвития у детей. Исследования на животных показывают негативное влияние на нервно-мышечную функцию, координацию и сенсомоторное развитие, а также на когнитивные функции у молодежи [66].

Борьба с ПАУ в пищевых продуктах имеет большое значение, особенно в отношении таких основных продуктов, как молоко. Молоко является основой любого рациона питания благодаря своему положительному влиянию на развитие организма, что делает присутствие ПАУ в молочных продуктах серьезной проблемой.

Липофильные ПАУ имеют свойство накапливаться в жирных пищевых продуктах, включая молоко и молочные продукты. Эти продукты, обладая высокой пищевой ценностью, широко потребляются детьми и пожилыми людьми по всему миру как основные источники питания [67–69].

Присутствие ПАУ в молоке и молочных продуктах во многом обусловлено загрязнением окружающей среды, которое возникает из-за кормов, воды и трав, а также из-за высокотемпературных методов обработки, используемых в процессе переработки молока (рис. 3). ПАУ в пищевых продуктах могут возникать как в результате загрязнения сырья окружающей средой (например, почвой),

так и в процессе высокотемпературной обработки. Точные механизмы их образования на уровне технологических процессов пока остаются неизвестными. Выделяют три основных механизма, которые оказывают значительное влияние на образование ПАУ в зависимости от типа термической обработки. Однако эти механизмы объясняют лишь часть причин появления ПАУ в пищевых продуктах. В научной литературе подчеркивается, что этот процесс является «чрезвычайно сложным». ПАУ формируются в ходе пиролиза и неполного сгорания органических веществ. При нагревании ключевые компоненты пищи, такие как глюкоза, аминокислоты и жирные кислоты, разлагаются и циклизуются. Разнообразие и количество ПАУ, образующихся в пищевых продуктах в процессе обработки, зависят от нескольких факторов [70–74]. К ним относятся расстояние до источника тепла, состав используемого топлива, условия обработки, время приготовления, а также методы, такие как повторное использование, конширование, измельчение и хранение.

Существуют три основных пути их образования:

1. Пиролиз пищевых компонентов (белков, жиров и углеводов) начинается при температуре выше 200 °С, а синтез ПАУ усиливается в диапазоне от 500 до 900 °С. Наибольший вклад в образование ПАУ вносит пиролиз жиров.

2. Капание липидов на источники тепла во время термической обработки приводит к образованию более летучих ПАУ, которые оседают на поверхности пищи по мере подъема дыма.

3. Неполное сгорание древесного угля, особенно при определенных методах приготовления пищи, способствует образованию ПАУ, которые «прилипают» к поверхностям продуктов [71–79].

На уровне химических реакций, несмотря на неопределенность среди исследователей, было выделено и описано несколько процессов. К ним относятся отщепление водорода с присоединением ацетилена (НА-М), конденсация ПАУ с НАМ,

образование ПАУ под воздействием радикалов, реакции Дильса — Альдера и присоединение фенила с циклизацией (АСР).

Из-за канцерогенных свойств ПАУ Агентство по охране окружающей среды (EPA) в США и Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA) ввели ограничения на их содержание в пищевых продуктах в 2002 году. Научный комитет по пищевым продуктам (SCF) выделил 15 генотоксичных ПАУ из 33 протестированных в качестве приоритетных соединений для оценки их потребления с пищей. Бензо[а]пирен (BaP) был предложен в качестве биомаркера для мониторинга воздействия ПАУ как из пищевых продуктов, так и из окружающей среды [80–83].

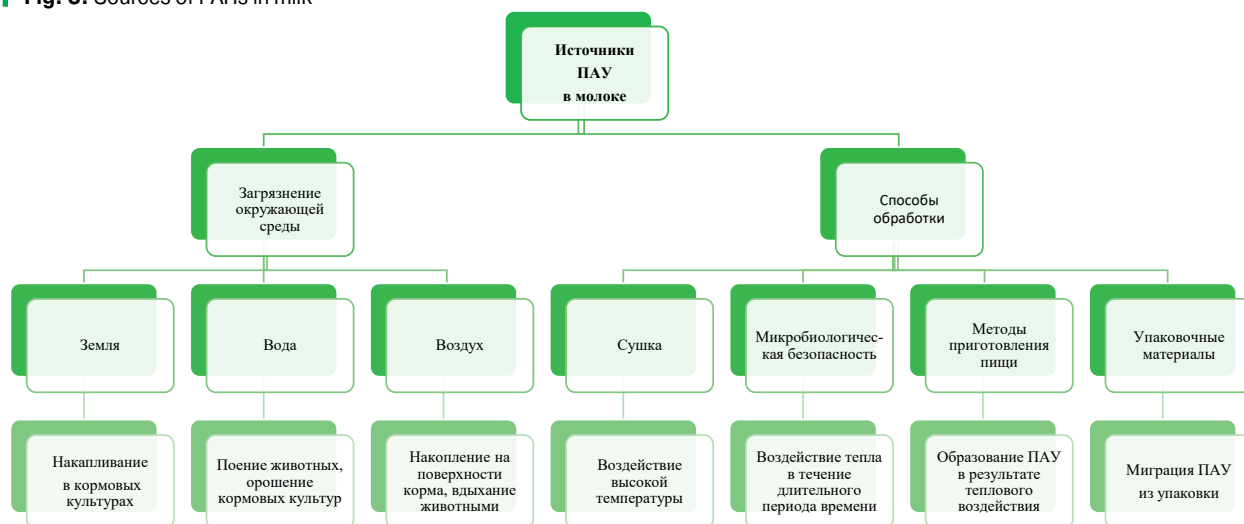
В Европейском союзе регулирование ПАУ в пищевых продуктах осуществляется в соответствии с Регламентом (ЕС) 2023/915. Этот регламент устанавливает предельные значения для бензо(а)пирена и суммы четырех ПАУ, в которую входят бензо(а)пирен, бензо(а)антрацен, бензо(б)флуорантен и хризен. Бензо[а]пирен выделяется благодаря своей высокой канцерогенности, и EFSA выбрало сумму этих четырех ПАУ в качестве надежного индикатора их содержания в пищевых продуктах.

Выбор правильного метода экстракции и измерения ПАУ имеет ключевое значение для получения достоверных результатов. Молоко представляет собой сложную матрицу, в которой липофильные ПАУ находятся не только в диспергированных каплях, но и связаны с жирами, которые в свою очередь могут быть удержаны в белковых структурах. Поэтому «идеальный» процесс экстракции должен включать не только перенос ПАУ из матрицы в растворитель (молоко → жир → растворитель), но и этап высвобождения жира. Это обеспечит более точные измерения и надежные результаты [84].

Проблема заключается в наличии множества мешающих веществ в матрицах молочных

Рис. 3. Источники ПАУ в молоке

Fig. 3. Sources of PAHs in milk



продуктов. Мицеллы казеина могут изменять свою структуру под воздействием температуры и pH, что приводит к захвату липидов в их состав. Кроме этих липидов, в мицеллы могут внедряться липофильные молекулы ПАУ, что создает дополнительные трудности при их извлечении. Кроме того, молоко содержит такие структуры, как мембрана жировых глобул молока — трехслойная оболочка, формирующая жировые глобулы. Благодаря своей неполярности ПАУ могут взаимодействовать с этими мембранами. Распад мицелл, вызванный изменениями электростатических взаимодействий, увеличивает жесткость мембраны и способствует образованию агрегатов «белок — липид», при этом молекулы белка располагаются на внешнем слое.

Таким образом, необходимо освобождать ПАУ из различных структур во время экстракции из молока и переработанных молочных продуктов. Неправильное выполнение этого этапа может привести к неточным аналитическим результатам, так как ПАУ могут экстрагироваться вместе с другими веществами, что усложняет их разделение и количественное определение. Существующие методы экстракции и идентификации ПАУ имеют значительные ограничения. Многие традиционные подходы, такие как жидкостная экстракция (ЖЭ) и экстракция Сокслета, требуют много времени, усилий и часто больших объемов опасных растворителей. Кроме того, высокое содержание жира в молочных продуктах, способствующее

накоплению ПАУ, усложняет процесс экстракции и требует использования больших объемов растворителей. Поэтому целесообразно разрабатывать новые перспективные методы, такие как твердофазная экстракция (ТФЭ) или твердофазная микроэкстракция (ТФМЭ). В настоящее время они более популярны и эффективны, чем методы, которые использовались ранее [85–87].

Кроме этапа высвобождения жира, важным аспектом является выбор подходящих растворителей для извлечения жира из молока. Этот выбор зависит от полярных и неполярных свойств матрицы и молекул ПАУ, а также от метода извлечения и применяемых хроматографических техник (таких как ВЭЖХ или ГХ).

Методы извлечения и очистки

Е.-S. Rawash и коллеги [88] обнаружили различия в уровнях ПАУ в зависимости от типа молока. В жидком молоке, прошедшем ультрапастеризацию, уровень ПАУ составил около 6,07 мкг/г, в то время как в сухом молоке этот показатель достиг 8,2 мкг/г. Была зафиксирована потеря низкомолекулярного нафталина, что произошло из-за деградации или испарения во время анализа (табл. 2).

К. Yап и его команда [92] отметили, что молоко с более высоким содержанием жира содержит больше ПАУ.

Исследования, проведенные Y. Sun и др. [93], показали, что уровень высокомолекулярных ПАУ значительно ниже в обезжиренном молоке. Это

Таблица 2. Примеры методов экстракции для анализа ПАУ в молоке

Table 2. Examples of extraction methods for PAH analysis in milk

Образец	Метод	Методика	ПАУ	Ссылка
Сухое молоко	Экстракция QuEChERS	1. Образец был гомогенизирован. 2. Были взяты 5 г молока. 3. Экстракционную смесь центрифугировали при 2500 об/мин 5 мин. 4. Концентрированный экстракт растворили в 5 мл гексана. 5. Подготавливали колонку для ТФЭ, заполненную активированным силикагелем и 1 г Na ₂ TAK ₄ . 6. Экстракт загружали в колонку и промывали 50 мл гексана. 7. Собранный элюент концентрировали с помощью роторного испарителя. 8. Образец растворили в 0,5 мл гексана.	Acenyl, Flu, Phen, Ant, Pyr, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA, BghiP	[88]
Сырое молоко	Экстракция QuEChERS	1. 5 мл гомогенизированного молока перенесли в коническую пробирку и встряхивали в течение 1 мин. 2. Добавили 15 мл гексана:аcetона (1:1) и встряхивали. 3. Добавляли 10 мл гексана:аcetона (1:1) и экстрагировали. 4. К смеси добавили сульфат магния (6,0 г) и NaCl (1,5 г). 5. Смесь центрифугировали в течение 5 мин. при 2500 об/мин., и ПАУ были выделены с помощью SPE. 6. Концентрированные экстракты растворяли в 5 мл н-гексана, загружали в колонку с активированным силикагелем и 1 г Na ₂ TAK ₄ . 7. Конечные элюаты (50 мл) концентрировали и растворяли в гексане.	Nap, 2M, 1M, Acenyl, Acen, Flu, Phen, Ant, Fluor, Pyr, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA	[91]
Молоко	LLE после омыления	1. Молоко гомогенизировали при 40 °C в течение 30 мин. 2. 8 мл 0,4 М NaOH в EtOH добавили к 4 мл молока. 3. Гомогенизировали в течение 1 мин. 4. Выпаривали при 40 °C на водяной бане до 1 мл. 5. Сушили в атмосфере азота. 6. Растворили в 1 мл изооктана. 7. Очистили на колонке с 6 г силикагеля и 1 г безводного сульфата натрия. 8. Колонку промывали 20 мл гексана, 30 мл гексана:дихлорметана (9:1) и 20 мл (1:1). 9. Органическую фазу выпаривали при 40 °C до почти сухого состояния. 10. Перенесли 1 мл во флакон и высушили в атмосфере азота. 11. Добавили 250 мкл изооктан и хранили при -20 °C.	Nap, 2M, 1M, Acenyl, Acen, Flu, Phen, Ant, Fluor, Pyr, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA	[92]
Молоко	LLE после омыления	1. Образцы молока (2 г) омыляли 4,0 мл 0,4 М раствора NaOH в EtOH. 2. 100 мкл раствора изооктана в CH ₂ добавляли CN и нагревали смесь при 60 °C на водяной бане 30 мин. 3. После охлаждения до комнатной температуры смесь дважды экстрагировали 2 мл гексана. 4. Гексан выпаривали, а остаток извлекали с помощью 100 мкл ACN.	Ant, Fluor, BaP, Phen, Pyr, BaA, Chr, BghiP, BbF, BkF, BaP, IcP, DhA	[93]

можно объяснить тем, что ПАУ являются высоколипофильными соединениями. В исследованиях была установлена положительная корреляция между содержанием жира и уровнем ПАУ в молоке, поэтому важным этапом подготовки образцов для анализа является гомогенизация, которая может быть достигнута путем тщательного перемешивания, встряхивания или обработки ультразвуком. В противном случае результаты могут оказаться недостоверными.

QuEChERS — это метод твердофазной экстракции для обнаружения остатков пестицидов (рис. 4), антибиотиков, ПАУ и других соединений в пищевых продуктах. Название представляет собой слово аббревиатуру, образованное от «быстрый, простой, дешевый, эффективный, точный и надежный».

К. Yan и коллеги [92] оптимизировали метод QuEChERS, сосредоточив внимание на выборе подходящей смеси экстракционных растворителей и использовании деионизированной воды в процедуре EMR-Lipid. Они установили, что наилучшие показатели восстановления и точности достигаются при использовании ацетонитрила и ацетона в соотношении 3:2. Кроме того, использование 3 мл деионизированной воды для активации EMR-Lipid способствовало улучшению параметров восстановления.

G.M.M.A. Hasan и его команда [89] применили метод QuEChERS для извлечения ПАУ. В их исследовании использовались 16 стандартных соединений ПАУ в качестве индикаторов загрязнения окружающей среды. Эффективность извлечения составила от 67,90% (для хризена) до 99,76% (для индено(1,2,3-сд)пирена), при этом значения предела обнаружения (LOD) варьировались от 0,3 до 1,0 нг/г, а пределы количественного определения (LOQ) находились в диапазоне от 1,0 до 4,0 нг/г.

J. Chay-Rincón и его команда [90] протестировали три метода жидкостной экстракции для подготовки образцов молока с целью определения ПАУ с использованием газового хроматографа, оснащенного пламенно-ионизационным и масс-детекторами. Первый метод, предшествующий омылению, показал удовлетворительные результаты только для ПАУ с низкой молекулярной массой (LMW).

Исследователи [94] отметили, что температура омыления значительно влияет на результаты анализа: с повышением температуры увеличиваются потери LMW.

Сорбент EMR-Lipid реализует эксклюзионные и неполярные взаимодействия с компонентами матрицы, тем самым обеспечивая надежную очистку образца. Данный сорбент используется

Рис. 4. Метод QuEChERS для определения пестицидов в пищевых продуктах

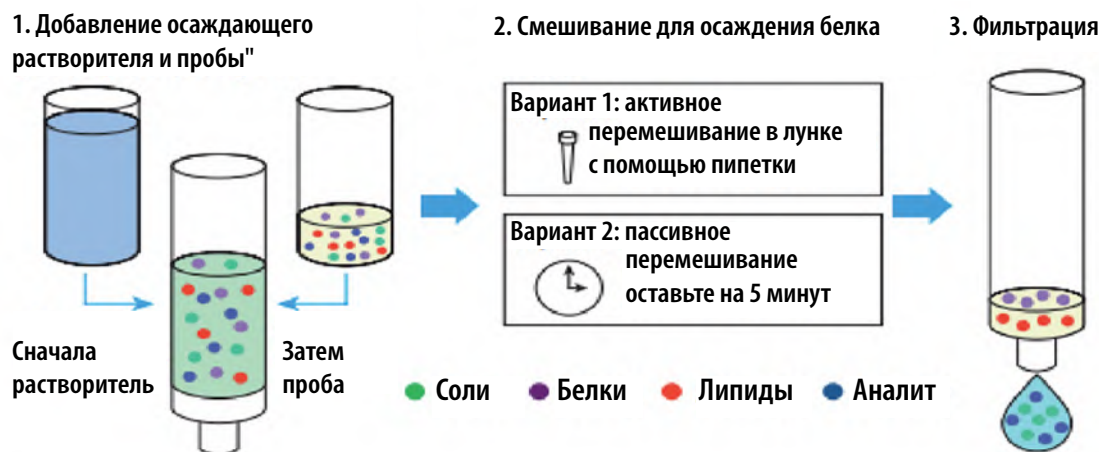
Fig. 4. QuEChERS method for the determination of pesticides in food products

1 этап - экстракция пестицидов из образца



2 этап - твердофазная (ТФЭ) очистка экстракта



Рис. 5. Методика очистки пробы от жиров с использованием сорбента EMR-Lipid**Fig. 5.** Methodology for purifying a sample from fats using the EMR-Lipid sorbent

в различных продуктах для подготовки проб со сложной матрицей — биологических образцов и продуктов с высоким содержанием жиров (рис. 5).

A.M. Girelli и коллеги [95] применяли метод омыления с теми же химическими веществами, что и J. Chay-Rincón [90]. Однако они проводили омыление в течение 30 мин. при температуре 60 °С, используя циклогексан или ацетонитрил для экстракции. Исследователи обнаружили зависимость между восстановлением и летучестью ПАУ: более летучие соединения демонстрировали более низкое восстановление, что указывает на большие потери аналита.

N. Kishikawa и его команда [91] в процессе оптимизации метода протестировали три экстракционных растворителя: гексан, циклогексан и толуол. Они не обнаружили значительных различий в эффективности экстракции. Была выявлена зависимость эффективности экстракции от параметров омыления, таких как концентрация гидроксида натрия и этанола, а также от времени процесса. Наилучшие результаты экстракции ПАУ были достигнуты при концентрации 0,6–3,0 М NaOH и 60–100% этанола. Во втором методе [58] использовалась экстракция с помощью раствора детергента. Одной из особенностей этого метода стало использование большого объема образца для экстракции — 250 мл молока в соотношении «образец — детергент» 1:1. При температуре 90 °С было получено меньшее извлечение низкомолекулярных (LMW) ПАУ по сравнению с высокомолекулярными (HMW). Третий метод, испытанный Chay-Rincón и др. [90], представляет собой экстракцию «жидкость — жидкость», основанную на методе экстракции жира из молока (AOAC 989.05).

Экстракция ПАУ проводилась с использованием смеси диэтилового и петролейного эфиров. Для испарения растворителей была выбрана низкая температура (40 °С), что способствовало улучшению восстановления ПАУ по сравнению с методом экстракции с использованием раствора детергента. S. Dobrinás и ее команда [96] применили простую экстракцию гексаном с

последующей очисткой для анализа ПАУ в детских молочных смесях. Исследователи отметили, что эффективность метода может достигать 95–98%, однако не предоставили дополнительных данных, подтверждающих достижение таких показателей.

При экстракции методом «жидкость — жидкость» наилучшие результаты извлечения были достигнуты с использованием смеси дихлорметана и н-гексана в соотношении 4:1 (в/в). В случае ТФЭ с колонкой C18 наивысшая эффективность была отмечена для хлороформа. Оба метода экстракции продемонстрировали сопоставимые результаты и подтвердили свою пригодность для анализа ПАУ в молоке.

Извлеченные и очищенные аналиты ПАУ подвергаются инструментальному анализу, чаще всего с использованием хроматографических методов. К ним относятся высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) и газовая хроматография (ГХ), которые обеспечивают эффективное разделение аналитов. Для идентификации и количественного определения отдельных полициклических углеводородов применяются соответствующие детекторы [97–101].

В таблице 3 представлены примеры исследований ПАУ на различных устройствах. Другие методы применяются реже и, похоже, вызывают интерес у исследователей. К ним относятся спектрометрический анализ (фосфориметрия при комнатной температуре (RTP), молекулярный флуоресцентный анализ (MFA) и поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS), метод хемилюминесценции (CL), электрохимические методы, а также иммунологические методы обнаружения, такие как иммуноферментный анализ (ELISA). Разработка новых методов, особенно тех, которые можно использовать с готовыми наборами, может быть оправдана благодаря сокращению времени анализа и упрощению процедуры исследования. Тем не менее хроматографические методы по-прежнему остаются референтными для этих подходов.

Таблица 3. Хроматографические методы анализа ПАУ в матрице молока

Table 3. Chromatographic methods for the analysis of PAHs in milk matrix

Образец	Метод	Результаты	ПАУ	Ссылка
Коровье молоко, грудное молоко и детская смесь	HPLC + FLD	ΣПАУ были обнаружены при 0,23–2,01, 0,19–2,15 и 1,68–2,28 мкг/кг в молоке, грудном молоке и детской смеси	Ant, Fluo, BaP, Phen, Pyr, BaA, Chr, BghiP, BbF, BkF, IcP, DhA	[91]
Грудное молоко	HPLC + FSFD	Образец грудного молока содержал: 8,03 нг/мл 2-ОНФ; 4,98 нг/мл (2-/3-)-ОНФ; 12,87 нг/мл (1-/9-)-ОНФ; 3,14 нг/мл 4-ОНФ; 3,45 нг/мл 1-ОНРy и 27,43 нг/мл 3-ОНBz[a]Py.	OPHAPH	[102]
Грудное молоко и детская смесь	HPLC + FLD	Средние концентрации ΣПАУ составили 114,93 мкг/кг в грудном молоке и 53,68 мкг/кг в детской смеси.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[103]
Коровье молоко	HPLC + FLD	Всего (ΣПАУ 5,86 мкг/кг) и полуобезжиренный (ΣПАУ 16,7 мкг/кг) пастеризованное молоко имело более низкий уровень ПАУ, чем ультрапастеризованное (ΣПАУ 18,6 и 18,3 мкг/кг). Для обезжиренного молока результаты были следующими: пастеризованный — ΣПАУ 26,6 мкг/кг; УПМ — ΣПАУ 17,8 мкг/кг.	Ant, Fluo, BaP, Phen, Pyr, BaA, Chr, BghiP, BbF, BkF, IcP, DhA	[95]
Сухое молоко	HPLC + UV-VIS + FLD	ΣПАУ был между 5,77 и 427,28 мкг/кг сухого молока.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[104]
Молочные продукты	GC + MS	Концентрация ΣПАУ варьировалась от 47 нг/кг в цельном овечьем молоке до 2120 нг/кг в коровьем масле.	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[84]
Коровье молоко	GC + MS	Содержание ПАУ 310 мкг/л	16 ПАУ, включенных в перечень США	[105]
Коровье молоко	GC + MS	Были обнаружены только BaA (0,5497 нг/г) и Chr (1,077 нг/г).	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[89]
Коровье молоко	GC + MS	Обнаруженные концентрации ПАУ варьируются от 0,1 до 16,2 нг/г.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[106]
Коровье молоко и молочные продукты	GC + MS	ΣПАУ обнаружены: в сухом молоке — 8,2 мкг/г, ультрапастеризованное молоко — 6,075 мкг/г, сырое молоко — 1,302 мкг/г.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[88]
Коровье молоко	GC + MS	Образцы из Европы и Океании — Σ ПАУ и BaP составили 7,34–13,60 мкг/кг и 0,46–0,83 мкг/кг. Образцы из Китая — Σ ПАУ и BaP составили 4,89–16,76 мкг/кг и 0,37–0,77 мкг/кг.	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[93]
Детские смеси	GC + MS	Средние концентрации ПАУ — от 0,015 до 0,37 мкг/кг.	16 ПАУ, включенных в перечень США	[96]
Детские смеси	GC + MS	Chr был обнаружен в концентрациях от 0,53 до 0,95 мкг/кг. BbF был определен в 11,1% детских смесей и смесей для детей старшего возраста. Концентрации BaP в 55,5% образцов превысили предел количественного определения.	BaA, Chr, BbF, BaP	[80]
Коровье молоко и растительные напитки	HS + GC + MS	Извлечение ПАУ из молока с добавками варьировалось от 89,2 до 112,7%.	Acen, Fluo, Flu, Pyr, Phen, BaA, Ant, Chr, BbF, BkF, BaP, DhA, BghiP, IcP	[107]
Коровье молоко	HS + GC + MS	Концентрации Phen, Ant, Fluo и Pyr составили 4,1, 0,9, 0,8 и 0,2 нг/г, что ниже пределов количественного определения предлагаемого метода.	Acen, Flu, Phen, Ant, Fluo, Pyr	[108]
Коровье молоко	GC + FID	Концентрации ΣПАУ варьировались от 15,6 до 1711,8 мкг/кг.	16 ПАУ, включенных в перечень ЕС	[109]

Высокоэффективная жидкостная хроматография

Жидкостная хроматография (ЖХ) использует жидкость в качестве подвижной фазы и в основном применяется для анализа органических соединений. В частности, ВЭЖХ в сочетании с флуоресцентным детектором (ФЛД) широко используется для определения ПАУ в пищевых матрицах. Этот метод выбирают благодаря его высокой

селективности и чувствительности. Хотя применяются и другие детекторы, такие как УФ-видимый (UV-Vis), диодный матричный (DAD) и быстросканирующий флуоресцентный детектор (FSFD), они используются реже и чаще служат дополнительными методами для подтверждения результатов. Метод FSFS основан на измерении спектра выходящего потока из хроматографической колонки. Результаты фиксируются при определенной

длине волны возбуждения (или испускания) путем быстрого сканирования длины волны, что позволяет получать трехмерные хроматограммы.

Методы могут быть адаптированы для оборудования, доступного в данной лаборатории. Жидкостная хроматография в сочетании с масс-спектрометрией (ЖХ-МС) редко используется в качестве предпочтительного метода из-за сложности достижения адекватной ионизации молекул ПАУ. Решение этой проблемы может быть затруднительным и не всегда приводит к удовлетворительным результатам.

ПАУ представляют собой очень стабильные молекулы, которые сложно ионизировать при атмосферном давлении с использованием традиционных методов, таких как ионизация электро-распылением (ESI) или химическая ионизация при атмосферном давлении (APCI). Трудности с ионизацией этих молекул связаны с их неполярной природой. Однако фотоионизация при атмосферном давлении может стать возможным решением этой проблемы. Этот метод продемонстрировал в 60 раз большую чувствительность при обнаружении метаболитов ПАУ по сравнению с традиционными методами ионизации, которые обычно неэффективны для неполярных молекул.

В отличие от газовой хроматографии, ВЭЖХ-ФЛД не сталкивается с проблемами, связанными с низкой летучестью ПАУ. Тем не менее некоторые из них, такие как циклопента[сд]пирен, обладают низкой флуоресценцией, что затрудняет анализ при низких уровнях загрязнения.

N. Kishikawa и коллеги [91] применили метод ВЭЖХ-ФЛД для анализа различных молочных продуктов, включая человеческое, коровье молоко, сгущенное молоко и детские смеси. Они достигли уровня извлечения 90% и выше, сделав вывод о том, что этот аналитический метод подходит для тестирования различных молочных продуктов.

E. Martin-Tornero [102] и его команда использовали ВЭЖХ для оценки потенциального воздействия загрязнения ПАУ, применяя маркеры ОНРАН. Эти маркеры менее липофильны, чем ПАУ, и, будучи продуктами их метаболизма, могут служить хорошими индикаторами. Исследователи использовали быстрое сканирующее флуориметрическое обнаружение и получили уровень извлечения всего 50%, что зависит от метода экстракции. Это подчеркивает необходимость корректировки методики и важность выбора подходящего метода экстракции. Данное исследование является одним из немногих, посвященных анализу ОНРАН в контексте оценки опасности ПАУ.

S. Santonicola и коллеги [103] провели тестирование различных образцов, включая грудное молоко и детское питание, однако не применяли маркеры. В результате они использовали наиболее распространенный метод ВЭЖХ-ФЛД. Полученные данные показали, что грудное молоко содержало более высокие уровни загрязняющих

веществ по сравнению с детским питанием. Это может быть связано с местом проживания матерей, чье молоко было исследовано. Команда A.M. Girelli [95] использовала тот же хроматографический метод и детектор для анализа коровьего и козьего молока, а также растительных напитков и обнаружила различные уровни восстановления (70–115%) в зависимости от конкретного ПАУ.

В своем анализе они рассмотрели влияние растворителей на восстановление. Авторы подчеркнули, что технологические процессы, такие как термическая обработка и удаление жира, могут влиять на содержание ПАУ в молоке и напитках. Подобно исследованию E. Martin-Tornero [102], изучили метаболиты, ОНРАН и сами ПАУ, однако они применили флуоресцентное обнаружение вместо быстрого сканирующего флуориметрического метода. Их результаты показали восстановление в диапазоне 79–116%. Они отметили, что анализ поведения ПАУ и их метаболитов в различных средах, особенно в водных, затрудняет количественное определение. Исследования показали, что хризен и бензо(к)флуорен были обнаружены исключительно в пастеризованном молоке, что указывает на то, что применяемая термическая обработка, безусловно, оказала влияние на образование ПАУ.

V.A. García Londoño и коллеги [104] использовали ВЭЖХ в сочетании с УФ-видимой и флуоресцентной детекцией для анализа. Они достигли степени извлечения всех ПАУ более 79%. При оценке коммерчески доступных молочных порошков исследователи пришли к выводу, что продукты из Бразилии и Аргентины содержат тревожно высокий уровень загрязнения углеводородами.

Газовая хроматография

ГХ применяет газ в качестве подвижной фазы и делится на газотвердую и газожидкостную хроматографию в зависимости от типа неподвижной фазы. В современных методах ГХ для разделения ПАУ часто используются металлоорганические структуры (МОС), графеновые листы или графитовый нитрид углерода.

Обнаружение с использованием метода ГХ-масс-спектрометрии (ГХ-МС) представляет собой довольно сложную задачу из-за низкой летучести высокомолекулярных ПАУ, таких как дибензопирены. Некоторые из этих соединений плохо разделяются в капиллярных колонках. Кроме того, могут возникать помехи от ПАУ, которые не являются объектами исследования (например, трифенилен).

В сравнении с 16 ПАУ, перечисленными Агентством по охране окружающей среды США, разделение 15 ПАУ, включенных в список Европейского союза, еще более затруднено из-за их более высокого уровня структурного сходства. Тем не менее ГХ-МС остается эффективным методом для разделения и идентификации ПАУ в сложных матрицах, таких как молоко. Этот метод требует

небольшого объема образца, а в сочетании с методом твердофазной микроэкстракции в режиме HeadSpace (HS-SPME) он может значительно упростить процесс. Такое сочетание позволяет избежать сложных методов экстракции и минимизировать потенциальные помехи, вызванные матрицей, которые могут возникнуть при использовании других методов экстракции.

L. Palacios Colón и коллеги [84] применили ГХ и МС для выявления ПАУ в различных молочных продуктах. Они оценили эффективность своего метода как высокую с пределами обнаружения от 1 до 200 нг/кг, однако все выявленные ПАУ относились к более легким типам. В исследовании использовались различные молочные матрицы, и эффективность извлечения отдельных ПАУ варьировалась в зависимости от тестируемого продукта, при этом все показатели превышали 80%. В детских смесях на основе молока, обработанного при высоких температурах, загрязнения ПАУ не обнаружили, что может свидетельствовать о снижении дополнительного образования ПАУ в молоке.

Подобный метод и колонку HP-5MS, одну из самых популярных для анализа ПАУ, использовали T.-L. Chung и коллеги [105] в исследовании жидкого молока. Они выделили тяжелые и наиболее токсичные ПАУ, такие как бензо[а]пирен (BaP), среди более легких соединений. Исследователи указали на вероятные источники загрязнения молока в регионе Тайвань, связывая их с промышленной деятельностью и тяжелой промышленностью.

При этом исследователи не учитывали возможное влияние переработки молока и не проводили измерения восстановления. G.M.M.A. Hasan и коллеги [89], применяя ГХ с МС, достигли уровня восстановления от 67,90% (Chr) до 99,76% (IcP) и выявили наличие BaA и Chr только в образцах сырого молока из Бангладеш. Они отметили, что этот уровень является низким и образцы происходили из регионов с «более высокой человеческой активностью».

N. Grova и коллеги [106] использовали колонку DB-XLB и сосредоточились на загрязнении окружающей среды, применяя сырое молоко. Их исследования показали, что уровень загрязнения в образцах, взятых вокруг цементного завода, был статистически выше. Однако они не рассматривали вопрос восстановления. E.-S. Rawash и его команда [88] исследовали различные матрицы, включая копченый сыр и жидкое молоко, но не проводили измерения восстановления. Они предположили, что часть загрязнения ПАУ в молочных продуктах возникает в процессе технологической обработки, например во время копчения и пастеризации.

Кроме того, они отметили, что не смогли обнаружить нафталин в образцах, что, по их мнению, могло быть связано с его деградацией или испарением в ходе лабораторных исследований. Идентификация ПАУ проводилась с использованием времени удерживания. Y. Sun и коллеги [93],

применяя метод GG-MS, получили коэффициенты извлечения от 62,81 до 105,18% для уровня 5 мкг/кг от 68,46 до 113,86% для более высокого уровня — 10 мкг/кг. Они указали на необходимость оптимизации обработки для снижения накопления ПАУ в молоке.

S. Dobrinas и коллеги [96], а также H. Badibostan и его команда [80] провели исследования детских смесей, представляющих собой термообработанные молочные продукты. Первая группа достигла восстановления на уровне 95–98%, в то время как вторая группа зафиксировала восстановление в диапазоне 50–120%. Основные различия в их методологиях заключались в подходах к экстракции. Исследование, проведенное командой S. Dobrinas [46], сосредоточилось на европейских образцах и выявило низкие уровни загрязнения. В то же время H. Badibostan и коллеги [80], работая в Иране, обнаружили более настораживающие уровни ПАУ в формулах, отметив, что их концентрация может увеличиваться до 100 °C в процессе обработки.

Применение метода HS к ГХ позволяет сократить необходимость в традиционной экстракции и отличается от экстракции SPME. Это снижает количество манипуляций с образцом, которые могут на него повлиять. N. Aguinaga и коллеги [107] использовали оптимизированный метод HS и отметили, что менее летучие ПАУ требуют более высокой температуры для воздействия на волокна, однако слишком высокая температура негативно сказывается на покрытии волокна. Оптимизированный метод обеспечил восстановление выше 89% для всех протестированных ПАУ.

Подобный подход был применен W. Lin и его командой [108], которые подтвердили целесообразность использования HS для сложных матриц, требующих уникального процесса очистки с применением других хроматографических методов. В другом исследовании N. Aguinaga и коллеги [107] повторили метод HS и успешно идентифицировали 16 ПАУ, указанных в списке EPA США, в детских смесях, молоке, йогурте и растительных напитках, получив извлечения в диапазоне от 87,6 до 112%.

C.M.A. Iwegbue и F.I. Bassey [109] применили менее традиционный подход, объединив ГХ с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) контролем. В результате им удалось достичь извлечения от 78,5 до 98,7% в подходящих образцах. Однако в своем обсуждении результатов они не уделили внимание влиянию выбранного метода на полученные данные. Тем не менее им удалось идентифицировать все 16 ПАУ из списка ЕС.

Обсуждаемые методы самыми популярными и эффективными для оценки ПАУ в молоке. Однако они достаточно сложны и требуют наличия хорошо оборудованных лабораторий, что ограничивает их практическое применение в молочной промышленности. Для успешной реализации необходимо сотрудничество между промышленностью и

профессиональными лабораториями, способными проводить анализы с использованием современных методов экстракции. Разработка более быстрых и простых методов позволит осуществлять постоянный мониторинг содержания ПАУ в молоке. Например, методы, использующие технологию HeadSpace, которые сокращают необходимость в многоэтапной экстракции, представляют собой многообещающее решение. Тем не менее текущие исследования в этой области должны быть более всесторонними, чтобы можно было делать окончательные выводы [110–114].

Другой подход заключается в сотрудничестве молочной промышленности с аналитическими лабораториями на этапах переработки и разработки продуктов. Оптимизация производственных процессов для снижения образования ПАУ может уменьшить необходимость в частом мониторинге, ограничиваясь лишь периодическими контрольными анализами.

Выводы/Conclusions

Хотя уровни ПАУ, обычно обнаруживаемые в молоке и молочных продуктах, относительно низки, их наличие связано с генотоксическими и провоспалительными рисками. Эта проблема становится более актуальной на фоне некоторых исследований, которые показывают, что в отдельных случаях уровни ПАУ могут превышать допустимые нормы. Молочные продукты являются основным источником питания для наиболее уязвимых групп населения, таких как дети и пожилые люди, для которых даже незначительное количество ПАУ может оказать негативное воздействие. Учитывая, что воздействие ПАУ может продолжаться

на протяжении всей жизни, начиная с рождения, крайне важно минимизировать их присутствие в повседневной жизни.

Необходимо продолжать исследования методов обнаружения ПАУ в молоке и молочных продуктах. Сложность этих матриц и поведение ПАУ затрудняют точные измерения. Тем не менее современные хроматографические методы, такие как ГХ и ВЭЖХ, позволяют выявлять даже низкие концентрации углеводов. Дальнейшие успехи в методах обнаружения во многом зависят от разработки эффективных методов экстракции. Новые подходы, такие как анализ HeadSpace (HS), твердофазная микроэкстракция (SPME) и твердофазная экстракция (SPE), демонстрируют значительный потенциал.

Молочная промышленность занимает важное место в обеспечении безопасности продукции, разрабатывая стратегии для снижения уровня ПАУ. Это включает в себя как борьбу с загрязнением окружающей среды, так и с ПАУ, возникающими в процессе производства. Исследователи могут способствовать этим усилиям, углубляя свои знания и разрабатывая стандартизированные, практические методы для снижения и обнаружения ПАУ в молочных продуктах.

Настоящий научный обзор демонстрирует важность точной диагностики ПАУ в молоке и молочных продуктах. Современная технология позволяет достичь надежных результатов, но требуются постоянные улучшения методов анализа и усиление контроля на производстве. В перспективе необходимы более эффективные и доступные способы тестирования, направленные на снижение рисков для потребителей.

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. Rebezov M.B., Temerbaeva M.V., Uryumtseva T.I. Results of mathematical analysis of experimental data fermentation of skimmed milk to produce a fermented milk product. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*. 2022; (3): 65–71. <https://www.elibrary.ru/wonjpw>
2. Serikova A. et al. Development of Technology of Fermented Milk Drink With Immune Stimulating Properties. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(4): 495–500. <https://www.elibrary.ru/xrwrf>
3. Итбалакова А.Б., Муктарханова Р.Б., Матибаева А.И., Ребезов М.Б. Разработка технологии нового кисломолочного продукта с использованием микробиологического консорциума (патентный поиск). *Научно-практическое развитие АПК и производства продуктов здорового питания. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной юбилею заслуженного работника высшей школы Российской Федерации доктора технических наук, профессора Н.Б. Гавриловой*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2025; 38–42. <https://www.elibrary.ru/lryjwd>
4. Темербаева М.В., Гаврилова Н.Б., Ребезов М.Б. Разработка биотехнологии молочного продукта для питания диабетиков. *Современное состояние, перспективы развития АПК и производства специализированных продуктов питания. Материалы Международной научно-практической конференции посвященной юбилею заслуженного работника высшей школы Российской Федерации доктора технических наук, профессора Н.Б. Гавриловой*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2020; 520–527. <https://www.elibrary.ru/ndipln>

REFERENCES

1. Rebezov M.B., Temerbaeva M.V., Uryumtseva T.I. Results of mathematical analysis of experimental data fermentation of skimmed milk to produce a fermented milk product. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*. 2022; (3): 65–71. <https://www.elibrary.ru/wonjpw>
2. Serikova A. et al. Development of Technology of Fermented Milk Drink With Immune Stimulating Properties. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(4): 495–500. <https://www.elibrary.ru/xrwrf>
3. Itbalakova A.B., Mukhtarkhanova R.B., Matibayeva A.I., Rebezov M.B. Development of a new fermented milk product technology using a microbiological consortium (patent search). *Scientific and practical development of the agro-industrial complex and the production of healthy food products. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the anniversary of Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation Doctor of Engineering, Professor N.B. Gavrilo*. Омск: Omsk State Agrarian University. 2025; 38–42 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/lryjwd>
4. Temerbaeva M.V., Gavrilo N.B., Rebezov M.B. Development of biotechnology of dairy product for nutrition of diabetics. *Current state and prospects for development of the agro-industrial complex and production of specialized food products. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the anniversary of Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation Doctor of Engineering, Professor N.B. Gavrilo*. Омск: Omsk State Agrarian University. 2020; 520–527 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/ndipln>

5. Павлова Я.С., Харина П.Д. Полезные свойства коровьего молока. Приоритетные направления развития аграрной науки и технологий. *Сборник тезисов научно-практической конференции, посвященной 75-летию юбилею факультета биотехнологии и пищевой инженерии*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 2: 589–591. <https://www.elibrary.ru/rmjpupe>
6. Smolnikova F. et al. Developing milk-fruit drinks for school nutrition. *Journal of Natural Remedies*. 2021; 21(9-1): 72–77. <https://www.elibrary.ru/fwcshs>
7. Белооков А.А., Белоокова О.В., Горелик О.В., Ребезов М.Б. Состав и свойства молока коров черно-пестрой породы разных генотипов. *Аграрная наука*. 2023; (3): 62–69. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-62-69>
8. Temerbaeva M. et al. Technology of Sour Milk Product For Elderly Nutrition. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(1): 291–295. <https://www.elibrary.ru/xnjgkt>
9. Иванникова Е.В., Дудинская Е.Н., Ткачева О.Н. Вопросы питания и нутритивной поддержки при остеопорозе. *Российский журнал гериатрической медицины*. 2023; (2): 92–104. <https://doi.org/10.37586/2686-8636-2-2023-92-104>
10. Епураш С.Д. Молочные белки. Польза молочных продуктов. Кузбасс: образование, наука, инновации. *Материалы XII Инновационной конференции*. Кемерово: Кемеровский государственный университет. 2024; 199–200. <https://www.elibrary.ru/axolun>
11. Смольникова Ф.Х., Наурзбаева Г.К., Асенова Б.К., Ребезов М.Б. Использование вторичных молочных продуктов пахты и сыворотки. Развитие биотехнологии: новая реальность. *Сборник Международной научно-практической конференции, приуроченной к 100-летию юбилею почетного ректора НГАУ профессора, доктора сельскохозяйственных наук И.И. Гудилина*. Новосибирск: Золотой колос. 2022; 154–159. <https://www.elibrary.ru/fdixfh>
12. Temerbaeva M. et al. Using of Creamy Bioadditives in the Production of Melted Cheese. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018; 7(4.38): 1240–1242. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.38.27796>
13. Нарузбаева Г.К., Смольникова Ф.Х., Ребезов М.Б. Совершенствование технологии сливочного масла. Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы. *Материалы VI Международной научно-практической онлайн-конференции*. Майкоп: Магарин О.Г. 2020; 513–515. <https://www.elibrary.ru/ulejxf>
14. Смольникова Ф.Х., Наурзбаева Г.К., Ребезов М.Б., Окусханова Э.К., Кулшатаева Б.М. Исследование пищевой безопасности сливочного масла с растительными компонентами. *Вестник Университета Шакарима. Серия: Технические науки*. 2024; (4): 190–199. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-25)
15. Расулов У.И., Боймуратова Х.Ш., Солиева И. Молоко — продукт с высокой пищевой ценностью (анализ литературных данных). *Молодые ученые — науке и практике АПК. Материалы Международной научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых*. Витебск: Витебская государственная академия ветеринарной медицины. 2024; 385–388. <https://www.elibrary.ru/hrjvaa>
16. Зобнина И.Н., Чепуштанова О.В. Физико-химические показатели овечьего молока. *Современные технологии птицеводства и мелкого животноводства. Сборник материалов круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023; 1: 191–192. <https://www.elibrary.ru/wsucpq>
17. Temerbaeva M. et al. Development of Yoghurt from Combination of Goat and Cow Milk. *Annual Research & Review in Biology*. 2018; 23(6): 38800. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/38800>
18. Темербаева М.В., Бестиева М.С., Урюмцева Т.И., Ребезов М.Б. Разработка технологии фруктовых десертов с бифидогенными свойствами на основе козьего молока. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2019; (3): 56–59. <https://www.elibrary.ru/rchhlw>
19. Темербаева М.В., Бестиева М.С., Урюмцева Т.И., Ребезов М.Б. Методология проведения исследований при разработке десертов на основе козьего молока. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2019; (4): 16–19. <https://www.elibrary.ru/anscah>
20. Темербаева М.В., Ребезов М.Б. Разработка технологии кисломолочного продукта на основе козьего молока для питания беременных и кормящих женщин. *Научные инновации — аграрному производству. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию юбилею Омского ГАУ*. Омск: Омский государственный аграрный университет. 2018; 1436–1440. <https://www.elibrary.ru/xmoqlz>
5. Pavlova Ya.S., Kharina P.D. Useful properties of cow's milk. *Priority directions for the development of agricultural science and technology. Collection of abstracts of the scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Faculty of Biotechnology and Food Engineering*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 2: 589–591 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/rmjpupe>
6. Smolnikova F. et al. Developing milk-fruit drinks for school nutrition. *Journal of Natural Remedies*. 2021; 21(9-1): 72–77. <https://www.elibrary.ru/fwcshs>
7. Belookov A.A., Belookova O.V., Gorelik O.V., Rebezov M.B. The composition and properties of the milk of black-and-white cows of different genotypes. *Agrarian science*. 2023; (3): 62–69 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-62-69>
8. Temerbayeva M. et al. Technology of Sour Milk Product For Elderly Nutrition. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(1): 291–295. <https://www.elibrary.ru/xnjgkt>
9. Ivannikova E.V., Dudinskaya E.N., Tkacheva O.N. Nutrients and Dietary Patterns for Osteoporosis. *Russian Journal of Geriatric Medicine*. 2023; (2): 92–104 (In Russian). <https://doi.org/10.37586/2686-8636-2-2023-92-104>
10. Epurash S.D. Milk proteins. The benefits of dairy products. *Kuzbass: education, science, innovation. Proceedings of the XII Innovation Convention*. Kemerovo: Kemerovo State University. 2024; 199–200 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/axolun>
11. Smolnikova F.Kh., Naurzbaeva G.K., Asenova B.K., Rebezov M.B. Use of secondary dairy products buttermilk and whey. *Biotechnology development: a new reality. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Honorary Rector of NSAU, Professor Doctor of Agricultural Sciences I.I. Gudilin*. Novosibirsk: Zolotoy kolos. 2022; 154–159 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/fdixfh>
12. Temerbaeva M. et al. Using of Creamy Bioadditives in the Production of Melted Cheese. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018; 7(4.38): 1240–1242. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.38.27796>
13. Naruzbayeva G.K., Smolnikova F.Kh., Rebezov M.B. Improving butter technology. *Science, education and innovation for the agro-industrial complex: status, problems and prospects. Proceedings of the VI International scientific and practical online conference*. Maykop: Magarin O.G. 2020; 513–515 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/ulejxf>
14. Smolnikova F.H., Naurzbaeva G.K., Rebezov M.B., Okuskhanova E.K., Kulshataeva B.M. Investigation of the food safety of butter with vegetable components. *Bulletin of Shakarim University. Series: Technical Sciences*. 2024; (4): 190–199 (In Russian). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-25)
15. Rasulov U.I., Boymuratova Kh.Sh., Solieva I. Milk is a product with high nutritional value (analysis of literary data). *Young scientists — for science and practice of the agro-industrial complex. Proceedings of the International scientific and practical conference of postgraduate students and young scientists*. Vitebsk: Vitebsk State Academy of Veterinary Medicine. 2024; 385–388 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/hrjvaa>
16. Zobnina I.N., Chepushtanova O.V. Physicochemical parameters of sheep milk. *Modern technologies of poultry farming and small-scale livestock farming. Collection of materials from a round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2023; 1: 191–192 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/wsucpq>
17. Temerbaeva M. et al. Development of Yoghurt from Combination of Goat and Cow Milk. *Annual Research & Review in Biology*. 2018; 23(6): 38800. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/38800>
18. Temerbaeva M.V., Bestieva M.S., Uryumtseva T.I., Rebezov M.B. Development of fruit dessert technology with bifidogenic properties based on goat's milk. *The Journal of Almaty Technological University*. 2019; (3): 56–59 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/rchhlw>
19. Temerbaeva M.V., Bestieva M.S., Uryumtseva T.I., Rebezov M.B. Research methodology in the development of desserts based on goat milk. *The Journal of Almaty Technological University*. 2019; (4): 16–19 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/anscah>
20. Temerbaeva M.V., Rebezov M.B. Development of technology of fermented milk product based on goat milk for nutrition pregnant and lactating women. *Scientific innovations for agricultural production. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of Omsk State Agrarian University*. Omsk: Omsk State Agrarian University. 2018; 1436–1440 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/xmoqlz>

21. Горелик А.С., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Динамика молочной продуктивности коров голштинской породы в зависимости от возраста в лактации. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2025; (1): 146–157. <https://www.elibrary.ru/wmyenz>
22. Ребезов М.Б., Наумова Н.Л., Альхамова Г.К., Кожевникова Е.Ю., Сорокин А.В. Конъюнктура предложения обогащенных молочных продуктов на примере Челябинска. *Молочная промышленность*. 2011; (8): 38–39. <https://www.elibrary.ru/nygqsr>
23. Калибеккызы Ж., Жакупбекова Ш.К., Ребезов М.Б., Смольникова Ф.Х., Майжанова А.О. Исследование качественных характеристик, показателей пищевой безопасности цельного молока, используемого для производства курта. *Вестник Университета Шакарима. Серия: Технические науки*. 2025; (1): 312–321. [https://doi.org/10.1016/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-40](https://doi.org/10.1016/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-40)
24. Gavrilova N. *et al.* Development of specialized food products for nutrition of sportsmen. *Journal of Critical Reviews*. 2020; 7(4): 233–236. <https://www.elibrary.ru/rhzigio>
25. Gavrilova N. *et al.* Advanced Biotechnology of Specialized Fermented Milk Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8(2): 2718–2722. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3158.078219>
26. Gavrilova N. *et al.* Biotechnology application in production of specialized dairy products using probiotic cultures immobilization. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019; 8(6): 642–648. <https://www.elibrary.ru/pydnoh>
27. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized fermented product for elderly nutrition. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 545–550. <https://www.elibrary.ru/jqfiot>
28. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized product for sports nutrition. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(4): 40–45. <https://www.elibrary.ru/strlxl>
29. Сапожникова О.О., Улыбина Л.В. Конъюнктура мирового рынка молочной продукции. Молодежь и инновации. Материалы XXI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет. 2025; 445–447. <https://www.elibrary.ru/jsvarb>
30. Pereira P.C. Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*. 2014; 30(6): 619–627. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2013.10.011>
31. Опополь Н.И., Сырку Р.Ф., Пынзару Ю.В., Богдевич О.П., Кадочников О.П. Гигиеническая оценка содержания полициклических ароматических углеводородов в продуктах питания и их поступления в организм населения. *Гигиена и санитария*. 2015; 94(4): 52–56. <https://www.elibrary.ru/uhkwbj>
32. Фрумин Г.Т. Прогресс химии и экологии. Часть II. Полициклические ароматические углеводороды и другие загрязняющие вещества. *Экологическая химия*. 2024; 33(5): 233–240. <https://www.elibrary.ru/rjhjae>
33. Cuesta-Triana F., Verdejo-Bravo C., Fernández-Pérez C., Martín-Sánchez F.J. Effect of Milk and Other Dairy Products on the Risk of Frailty, Sarcopenia, and Cognitive Performance Decline in the Elderly: A Systematic Review. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S105–S119. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy105>
34. Zanini B., Simonetto A., Zubani M., Castellano M., Gilioli G. The Effects of Cow-Milk Protein Supplementation in Elderly Population: Systematic Review and Narrative Synthesis. *Nutrients*. 2020; 12(9): 2548. <https://doi.org/10.3390/nu12092548>
35. Kuramshina N. *et al.* Heavy metals content in meat and milk of Orenburg region of Russia. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 1031–1035. <https://www.elibrary.ru/zsxhdf>
36. Лаврушина Е.Е., Ребезов М.Б., Топурия Г.М., Топурия Л.Ю., Ступина М.Ю. Гигиеническая оценка молока коз по содержанию радионуклидов. Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященный памяти заслуженного работника Высшей школы РФ, почетного работника высшего профессионального образования РФ, почетного профессора Брянской ГСХА, почетного гражданина Брянской области доктора биологических наук, профессора Е.П. Ващекина. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2025; 115–119. <https://www.elibrary.ru/blide>
21. Gorelik A.S., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Dynamics of milk productivity of Holstein cows depending on age in lactations. *Journal of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary and Zootechnics*. 2025; (1): 146–157 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/wmyenz>
22. Rebezov M.B., Naumova N.L., Alhamova G.K., Kozhevnikova E.Yu., Sorokin A.V. Offers of the enriched milk products in Chelyabinsk. *Dairy industry*. 2011; (8): 38–39 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/nygqsr>
23. Kalibekkyzy Zh., Zhakupbekova Sh.K., Rebezov M.B., Smolnikova F.H., Maizhanova A.O. Research of qualitative characteristics, indicators of food safety of whole milk used for the production of kurt. *Bulletin of Shakarim University. Series: Technical Sciences*. 2025; (1): 312–321 (In Russian). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-40](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-40)
24. Gavrilova N. *et al.* Development of specialized food products for nutrition of sportsmen. *Journal of Critical Reviews*. 2020; 7(4): 233–236. <https://www.elibrary.ru/rhzigio>
25. Gavrilova N. *et al.* Advanced Biotechnology of Specialized Fermented Milk Products. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8(2): 2718–2722. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3158.078219>
26. Gavrilova N. *et al.* Biotechnology application in production of specialized dairy products using probiotic cultures immobilization. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019; 8(6): 642–648. <https://www.elibrary.ru/pydnoh>
27. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized fermented product for elderly nutrition. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 545–550. <https://www.elibrary.ru/jqfiot>
28. Chernopolskaya N. *et al.* Biotechnology of specialized product for sports nutrition. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(4): 40–45. <https://www.elibrary.ru/strlxl>
29. Sapozhnikova O.O., Ulybina L.V. World dairy products market conjuncture. *Youth and Innovation. Proceedings of the XXI All-Russian (national) scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, and students*. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University. 2025; 445–447 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/jsvarb>
30. Pereira P.C. Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*. 2014; 30(6): 619–627. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2013.10.011>
31. Opopol N.I., Syрку R.F., Pynzaru Yu.V., Bogdevich O.P., Kadochnikov O.P. Hygienic assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons content and estimation of their intake with food by the population. *Hygiene and Sanitation*. 2015; 94(4): 52–56 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/uhkwbj>
32. Frumin G.T. Progress of chemistry and ecology. Part II. Polycyclic aromatic hydrocarbons and other pollutants. *Ekologicheskaya khimiya*. 2024; 33(5): 233–240 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/rjhjae>
33. Cuesta-Triana F., Verdejo-Bravo C., Fernández-Pérez C., Martín-Sánchez F.J. Effect of Milk and Other Dairy Products on the Risk of Frailty, Sarcopenia, and Cognitive Performance Decline in the Elderly: A Systematic Review. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S105–S119. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy105>
34. Zanini B., Simonetto A., Zubani M., Castellano M., Gilioli G. The Effects of Cow-Milk Protein Supplementation in Elderly Population: Systematic Review and Narrative Synthesis. *Nutrients*. 2020; 12(9): 2548. <https://doi.org/10.3390/nu12092548>
35. Kuramshina N. *et al.* Heavy metals content in meat and milk of Orenburg region of Russia. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2019; 11(1): 1031–1035. <https://www.elibrary.ru/zsxhdf>
36. Lavrushina E.E., Rebezov M.B., Topuria G.M., Topuria L.Yu., Stupina M.Yu. Hygienic evaluation of goat milk by radionuclide content. *Actual problems of intensive development of animal husbandry. Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Professor of the Bryansk State Agricultural Academy, Honorary citizen of the Bryansk region, Doctor of Biological Sciences, Professor E.P. Vashchekina*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 115–119 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/blide>

37. Смольникова Ф.Х., Ребезов М.Б., Исакова З.И. Пищевая безопасность национальных молочных продуктов. *Продовольственная безопасность и импортозамещение в условиях современного социально-экономического развития России. Материалы Международной научно-практической конференции*. Коломна: Московский государственный областной социально-гуманитарный институт. 2015; 86–90. <https://www.elibrary.ru/zalygd>
38. Суесинова Ж.А. Проблемы метрологического обеспечения качества и безопасности молока и молочной продукции. *Россия — Евразия — мир: интеграция — развитие — перспектива. Материалы XIV Евразийского экономического форума молодежи*. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет. 2024; 3: 99–101. <https://www.elibrary.ru/iervkn>
39. Чупракова А.М., Ребезов М.Б. Анализ результатов проб молока и молочных продуктов, хлебобулочных и кондитерских изделий на содержание токсичных элементов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2016; 4(1): 47–54. <https://doi.org/10.14529/food160106>
40. Ogori A.F., Girgih A.T., Abu J.O., Eke M.O. Food Derived Bioactive Peptides for Health Enhancement and Management of Some Chronic Diseases. *Asian Food Science Journal*. 2019; 8(1): 1–11. <https://doi.org/10.9734/afsj/2019/v8i129981>
41. Żbik K., Onopiuk A., Górski-Horczyzak E., Wierzbicka A. Trends and Opportunities in the Dairy Industry: A2 Milk and Processing Methods. *Applied Sciences*. 2024; 14(15): 6513. <https://doi.org/10.3390/app14156513>
42. Wang C., Wang X., Yuan X., Ren J., Gong P. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in air, grass and yak butter from Namco in the central Tibetan Plateau. *Environmental Pollution*. 2015; 201: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.037>
43. Balthazar C.F. et al. Sheep Milk: Physicochemical Characteristics and Relevance for Functional Food Development. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017; 16(2): 247–262. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12250>
44. Lad S.S., Aparnathi K.D., Mehta B., Velpula S. Goat Milk in Human Nutrition and Health — A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6(5): 1781–1792. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.194>
45. Venkatraman G. et al. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review. *Chemosphere*. 2024; 351: 141227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141227>
46. Domingo J.L., Nadal M. Human dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review of the scientific literature. *Food and Chemical Toxicology*. 2015; 86: 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.10.002>
47. Ellickson K.M., Herbrandson C., Krause M.J., Pratt G.C., Kellock K.A. Comparative risk estimates of an expanded list of PAHs from community and source-influenced air sampling. *Chemosphere*. 2020; 253: 126680. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126680>
48. Cai C., Wu P., Zhou P., Yang D., Hu Z. Detection, Risk Assessment, and Survey of Four Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Markers in Infant Formula Powder. *Journal of Food Quality*. 2020; 2020: 2959532. <https://doi.org/10.1155/2020/2959532>
49. Amirdivani S. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *International Journal of Dairy Technology*. 2019; 72(1): 120–131. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12567>
50. Yebra-Pimentel I., Fernández-González R., Martínez Carballo E., Simal-Gándara J. Searching ingredients polluted by polycyclic aromatic hydrocarbons in feeds due to atmospheric or pyrolytic sources. *Food Chemistry*. 2012; 135(3): 2043–2051. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.069>
51. Ge Y., Wu S., Yan K. Concentrations, influencing factors, risk assessment methods, health hazards and analyses of polycyclic aromatic hydrocarbons in dairies: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(23): 6168–6181. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2028717>
52. Rengarajan T., Rajendran P., Nandakumar N., Lokeshkumar B., Rajendran P., Nishigaki I. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2015; 5(3): 182–189. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30003-4](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30003-4)
53. Shoaef F., Talebi-Ghane E., Amirsadeghi S., Mehri F. The investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in milk and its products: A global systematic review, meta-analysis and health risk assessment. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105645. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105645>
37. Smolnikova F.Kh., Rebezov M.B., Isakova Z.I. Food safety of national dairy products. *Food security and import substitution in the context of modern socio-economic development of Russia. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Kolomna: Moscow State Regional Social and Humanitarian Institute. 2015; 86–90 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/zalygd>
38. Suesinova Zh.A. Problems of metrological assurance of quality and safety of milk and dairy products. *Russia — Eurasia — the world: integration — development — prospect. Proceedings of the XIV Eurasian Economic Youth Forum*. Yekaterinburg: Ural State University of Economics. 2024; 3: 99–101 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/iervkn>
39. Chuprakova A.M., Rebezov M.B. Analysis of the results of the samples of milk and dairy products, as well as bakery and confectionery products on the content of toxic elements. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2016; 4(1): 47–54 (In Russian). <https://doi.org/10.14529/food160106>
40. Ogori A.F., Girgih A.T., Abu J.O., Eke M.O. Food Derived Bioactive Peptides for Health Enhancement and Management of Some Chronic Diseases. *Asian Food Science Journal*. 2019; 8(1): 1–11. <https://doi.org/10.9734/afsj/2019/v8i129981>
41. Żbik K., Onopiuk A., Górski-Horczyzak E., Wierzbicka A. Trends and Opportunities in the Dairy Industry: A2 Milk and Processing Methods. *Applied Sciences*. 2024; 14(15): 6513. <https://doi.org/10.3390/app14156513>
42. Wang C., Wang X., Yuan X., Ren J., Gong P. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in air, grass and yak butter from Namco in the central Tibetan Plateau. *Environmental Pollution*. 2015; 201: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.037>
43. Balthazar C.F. et al. Sheep Milk: Physicochemical Characteristics and Relevance for Functional Food Development. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017; 16(2): 247–262. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12250>
44. Lad S.S., Aparnathi K.D., Mehta B., Velpula S. Goat Milk in Human Nutrition and Health — A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6(5): 1781–1792. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.194>
45. Venkatraman G. et al. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review. *Chemosphere*. 2024; 351: 141227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141227>
46. Domingo J.L., Nadal M. Human dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review of the scientific literature. *Food and Chemical Toxicology*. 2015; 86: 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.10.002>
47. Ellickson K.M., Herbrandson C., Krause M.J., Pratt G.C., Kellock K.A. Comparative risk estimates of an expanded list of PAHs from community and source-influenced air sampling. *Chemosphere*. 2020; 253: 126680. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126680>
48. Cai C., Wu P., Zhou P., Yang D., Hu Z. Detection, Risk Assessment, and Survey of Four Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Markers in Infant Formula Powder. *Journal of Food Quality*. 2020; 2020: 2959532. <https://doi.org/10.1155/2020/2959532>
49. Amirdivani S. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *International Journal of Dairy Technology*. 2019; 72(1): 120–131. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12567>
50. Yebra-Pimentel I., Fernández-González R., Martínez Carballo E., Simal-Gándara J. Searching ingredients polluted by polycyclic aromatic hydrocarbons in feeds due to atmospheric or pyrolytic sources. *Food Chemistry*. 2012; 135(3): 2043–2051. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.069>
51. Ge Y., Wu S., Yan K. Concentrations, influencing factors, risk assessment methods, health hazards and analyses of polycyclic aromatic hydrocarbons in dairies: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(23): 6168–6181. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2028717>
52. Rengarajan T., Rajendran P., Nandakumar N., Lokeshkumar B., Rajendran P., Nishigaki I. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2015; 5(3): 182–189. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30003-4](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30003-4)
53. Shoaef F., Talebi-Ghane E., Amirsadeghi S., Mehri F. The investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in milk and its products: A global systematic review, meta-analysis and health risk assessment. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105645. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105645>

54. Chen B.-H., Inbaraj B.S., Hsu K.-C. Recent advances in the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in food and water. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2022; 30(4): 494–522. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3429>
55. Mogashane T.M., Mokoena L., Tshilongo J. A Review on Recent Developments in the Extraction and Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Environmental Samples. *Water*. 2024; 16(17): 2520. <https://doi.org/10.3390/w16172520>
56. Soursou V., Campo J., Picó Y. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: An update on recent advances. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 2023; 37: e00195. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00195>
57. Liu L., Chen X., Duan Y., Wu Z., Xu L. Distribution, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils under different landform conditions of Taiyuan, China. *Frontiers in Environmental Science*. 2024; 12: 1363297. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1363297>
58. Sahoo B.M., Kumar B.V.V.R., Banik B.K., Borah P. Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs): Structures, Synthesis and Their Biological Profile. *Current Organic Synthesis*. 2020; 17(8): 625–640. <https://doi.org/10.2174/1570179417666200713182441>
59. Santonicola S., Albrizio S., Murru N., Ferrante M.C., Mercogliano R. Study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and meat/fish based baby food available in Italy. *Chemosphere*. 2017; 184: 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.017>
60. Chatzimichail S., Rahimi F., Saifuddin A., Surman A.J., Taylor-Robinson S.D., Salehi-Reyhani A. Hand-portable HPLC with broadband spectral detection enables analysis of complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Communications Chemistry*. 2021; 4: 17. <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00457-7>
61. Liu T., Zhang L., Pan L., Yang D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons' Impact on Crops and Occurrence, Sources, and Detection Methods in Food: A Review. *Foods*. 2024; 13(13): 1977. <https://doi.org/10.3390/foods13131977>
62. Sampaio G.R. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(11): 6010. <https://doi.org/10.3390/ijms22116010>
63. Islam F. et al. Natural Small Molecules in Gastrointestinal Tract and Associated Cancers: Molecular Insights and Targeted Therapies. *Molecules*. 2022; 27(17): 5686. <https://doi.org/10.3390/molecules27175686>
64. Korsh J., Shen A., Aliano K., Davenport T. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Breast Cancer: A Review of the Literature. *Breast Care*. 2015; 10(5): 316–318. <https://doi.org/10.1159/000436956>
65. Mallah M.A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*. 2022; 296: 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>
66. Bodduluru L.N., Kasala E.R., Barua C.C., Karnam K.C., Dahiya V., Ellutla M. Antiproliferative and antioxidant potential of hesperetin against benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis in Swiss albino mice. *Chemico-Biological Interactions*. 2015; 242: 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.10.020>
67. Singh T.P., Arora S., Sarkar M. Yak milk and milk products: Functional, bioactive constituents and therapeutic potential. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105637. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105637>
68. Chalupa-Krebzdak S., Long C.J., Bohrer B.M. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *International Dairy Journal*. 2018; 87: 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.07.018>
69. Gil Á., Ortega R.M. Introduction and Executive Summary of the Supplement, Role of Milk and Dairy Products in Health and Prevention of Noncommunicable Chronic Diseases: A Series of Systematic Reviews. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S67–S73. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz020>
70. Hu C. et al. Association of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure with atherosclerotic cardiovascular disease risk: A role of mean platelet volume or club cell secretory protein. *Environmental Pollution*. 2018; 233: 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.042>
71. Wei R., Yang M., Yao C., Chen W., Yang L., Ni J. Characteristics and Biodegradation of Nonextractable Residues of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Historically Polluted Soils. *Water Air and Soil Pollution*. 2024; 235(5): 300. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07115-3>
54. Chen B.-H., Inbaraj B.S., Hsu K.-C. Recent advances in the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in food and water. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2022; 30(4): 494–522. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3429>
55. Mogashane T.M., Mokoena L., Tshilongo J. A Review on Recent Developments in the Extraction and Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Environmental Samples. *Water*. 2024; 16(17): 2520. <https://doi.org/10.3390/w16172520>
56. Soursou V., Campo J., Picó Y. Revisiting the analytical determination of PAHs in environmental samples: An update on recent advances. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 2023; 37: e00195. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00195>
57. Liu L., Chen X., Duan Y., Wu Z., Xu L. Distribution, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils under different landform conditions of Taiyuan, China. *Frontiers in Environmental Science*. 2024; 12: 1363297. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1363297>
58. Sahoo B.M., Kumar B.V.V.R., Banik B.K., Borah P. Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs): Structures, Synthesis and Their Biological Profile. *Current Organic Synthesis*. 2020; 17(8): 625–640. <https://doi.org/10.2174/1570179417666200713182441>
59. Santonicola S., Albrizio S., Murru N., Ferrante M.C., Mercogliano R. Study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and meat/fish based baby food available in Italy. *Chemosphere*. 2017; 184: 467–472. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.017>
60. Chatzimichail S., Rahimi F., Saifuddin A., Surman A.J., Taylor-Robinson S.D., Salehi-Reyhani A. Hand-portable HPLC with broadband spectral detection enables analysis of complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Communications Chemistry*. 2021; 4: 17. <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00457-7>
61. Liu T., Zhang L., Pan L., Yang D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons' Impact on Crops and Occurrence, Sources, and Detection Methods in Food: A Review. *Foods*. 2024; 13(13): 1977. <https://doi.org/10.3390/foods13131977>
62. Sampaio G.R. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(11): 6010. <https://doi.org/10.3390/ijms22116010>
63. Islam F. et al. Natural Small Molecules in Gastrointestinal Tract and Associated Cancers: Molecular Insights and Targeted Therapies. *Molecules*. 2022; 27(17): 5686. <https://doi.org/10.3390/molecules27175686>
64. Korsh J., Shen A., Aliano K., Davenport T. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Breast Cancer: A Review of the Literature. *Breast Care*. 2015; 10(5): 316–318. <https://doi.org/10.1159/000436956>
65. Mallah M.A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*. 2022; 296: 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>
66. Bodduluru L.N., Kasala E.R., Barua C.C., Karnam K.C., Dahiya V., Ellutla M. Antiproliferative and antioxidant potential of hesperetin against benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis in Swiss albino mice. *Chemico-Biological Interactions*. 2015; 242: 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.10.020>
67. Singh T.P., Arora S., Sarkar M. Yak milk and milk products: Functional, bioactive constituents and therapeutic potential. *International Dairy Journal*. 2023; 142: 105637. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105637>
68. Chalupa-Krebzdak S., Long C.J., Bohrer B.M. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *International Dairy Journal*. 2018; 87: 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.07.018>
69. Gil Á., Ortega R.M. Introduction and Executive Summary of the Supplement, Role of Milk and Dairy Products in Health and Prevention of Noncommunicable Chronic Diseases: A Series of Systematic Reviews. *Advances in Nutrition*. 2019; 10(S2): S67–S73. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz020>
70. Hu C. et al. Association of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure with atherosclerotic cardiovascular disease risk: A role of mean platelet volume or club cell secretory protein. *Environmental Pollution*. 2018; 233: 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.042>
71. Wei R., Yang M., Yao C., Chen W., Yang L., Ni J. Characteristics and Biodegradation of Nonextractable Residues of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Historically Polluted Soils. *Water Air and Soil Pollution*. 2024; 235(5): 300. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07115-3>

72. Wang Z., Ng K., Warner R.D., Stockmann R., Fang Z. Reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022; 21(2): 1598–1626. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12905>
73. Hamidi E.N., Hajeb P., Selamat J., Razis A.F.A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and their Bioaccessibility in Meat: a Tool for Assessing Human Cancer Risk. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2016; 17(1): 15–23. <http://doi.org/10.7314/APJCP.2016.17.1.15>
74. Onopiuk A., Kołodziejczak K., Szpicer A., Wojtasik-Kalinowska I., Wierzbicka A., Półtorak A. Analysis of factors that influence the PAH profile and amount in meat products subjected to thermal processing. *Trends in Food Science and Technology*. 2021; 115: 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.043>
75. Chen B.H., Chen Y.C. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Smoke from Heated Model Lipids and Food Lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001; 49(11): 5238–5243. <https://doi.org/10.1021/jf0106906>
76. Maciejczyk M., Tyrpień-Golder K., Janoszka B., Gierat B., Muzyka R. Mutagenic and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food — occurrence, human health effects, and assessment methods of exposure. *Environmental Medicine*. 2023; 26(1–2): 8–15. <https://doi.org/10.26444/ms/168971>
77. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food: Question N°EFSA-Q-2007-136. EFSA Journal No. 724. *European Food Safety Authority*. 2008; 114.
78. Zelinkova Z., Wenzl T. The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food — A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2015; 35(2–4): 248–284. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.918550>
79. Majumder D., Sarkar C., Debnath R., Tribedi P., Maiti D. Mechanistic insight into the synergism of IL-27 and IL-28B in regulation of benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis associated ROS/NF- κ B/NLRP3 crosstalk. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 354: 109807. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.109807>
80. Badibostan H. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in infant formulae, follow-on formulae, and baby foods in Iran: An assessment of risk. *Food and Chemical Toxicology*. 2019; 131: 110640. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110640>
81. Nie C. *et al.* Structure, Biological Functions, Separation, Properties, and Potential Applications of Milk Fat Globule Membrane (MFGM): A Review. *Nutrients*. 2024; 16(5): 587. <https://doi.org/10.3390/nu16050587>
82. Belo R.F.C., Pissinatti R., de Souza S.V.C., Junqueira R.G. Evaluating Matrix Effects in the Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Food: Can These Interferences Be Neglected for Isotope Dilution?. *Food Analytical Methods*. 2017; 10(5): 1488–1499. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0706-0>
83. Anselmo S., Sancataldo G., Foderà V., Vetri V. α -casein micelles-membranes interaction: Flower-like lipid protein coaggregates formation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*. 2022; 1866(10): 130196. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2022.130196>
84. Palacios Colón L., Rascón A.J., Ballesteros E. Trace-Level Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dairy Products Available in Spanish Supermarkets by Semi-Automated Solid-Phase Extraction and Gas Chromatography–Mass Spectrometry Detection. *Foods*. 2022; 11(5): 713. <https://doi.org/10.3390/foods11050713>
85. Alahmad W., Kaya S.I., Cetinkaya A., Varanusupakul P., Ozkan S.A. Green chemistry methods for food analysis: Overview of sample preparation and determination. *Advances in Sample Preparation*. 2023; 5: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2023.100053>
86. Jagirani M.S., Ozalp O., Soylak M. New Trend in the Extraction of Pesticides from the Environmental and Food Samples Applying Microextraction Based Green Chemistry Scenario: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2022; 52(6): 1343–1369. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1874867>
87. Galmiche M., Delhomme O., François Y.-N., Millet M. Environmental analysis of polar and non-polar Polycyclic Aromatic Compounds in airborne particulate matter, settled dust and soot: Part II: Instrumental analysis and occurrence. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2021; 134: 116146. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116146>
72. Wang Z., Ng K., Warner R.D., Stockmann R., Fang Z. Reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022; 21(2): 1598–1626. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12905>
73. Hamidi E.N., Hajeb P., Selamat J., Razis A.F.A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and their Bioaccessibility in Meat: a Tool for Assessing Human Cancer Risk. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2016; 17(1): 15–23. <http://doi.org/10.7314/APJCP.2016.17.1.15>
74. Onopiuk A. Analysis of Factors That Influence the PAH Profile and Amount in Meat Products Subjected to Thermal Processing. *Trends in Food Science and Technology*. 2021; 115: 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.043>
75. Chen B.H., Chen Y.C. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Smoke from Heated Model Lipids and Food Lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001; 49(11): 5238–5243. <https://doi.org/10.1021/jf0106906>
76. Maciejczyk M., Tyrpień-Golder K., Janoszka B., Gierat B., Muzyka R. Mutagenic and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food — occurrence, human health effects, and assessment methods of exposure. *Environmental Medicine*. 2023; 26(1–2): 8–15. <https://doi.org/10.26444/ms/168971>
77. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food: Question N°EFSA-Q-2007-136. EFSA Journal No. 724. *European Food Safety Authority*. 2008; 114.
78. Zelinkova Z., Wenzl T. The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food — A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2015; 35(2–4): 248–284. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.918550>
79. Majumder D., Sarkar C., Debnath R., Tribedi P., Maiti D. Mechanistic insight into the synergism of IL-27 and IL-28B in regulation of benzo(a)pyrene-induced lung carcinogenesis associated ROS/NF- κ B/NLRP3 crosstalk. *Chemico-Biological Interactions*. 2022; 354: 109807. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.109807>
80. Badibostan H. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in infant formulae, follow-on formulae, and baby foods in Iran: An assessment of risk. *Food and Chemical Toxicology*. 2019; 131: 110640. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.110640>
81. Nie C. *et al.* Structure, Biological Functions, Separation, Properties, and Potential Applications of Milk Fat Globule Membrane (MFGM): A Review. *Nutrients*. 2024; 16(5): 587. <https://doi.org/10.3390/nu16050587>
82. Belo R.F.C., Pissinatti R., de Souza S.V.C., Junqueira R.G. Evaluating Matrix Effects in the Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Food: Can These Interferences Be Neglected for Isotope Dilution?. *Food Analytical Methods*. 2017; 10(5): 1488–1499. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0706-0>
83. Anselmo S., Sancataldo G., Foderà V., Vetri V. α -casein micelles-membranes interaction: Flower-like lipid protein coaggregates formation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — General Subjects*. 2022; 1866(10): 130196. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2022.130196>
84. Palacios Colón L., Rascón A.J., Ballesteros E. Trace-Level Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dairy Products Available in Spanish Supermarkets by Semi-Automated Solid-Phase Extraction and Gas Chromatography–Mass Spectrometry Detection. *Foods*. 2022; 11(5): 713. <https://doi.org/10.3390/foods11050713>
85. Alahmad W., Kaya S.I., Cetinkaya A., Varanusupakul P., Ozkan S.A. Green chemistry methods for food analysis: Overview of sample preparation and determination. *Advances in Sample Preparation*. 2023; 5: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2023.100053>
86. Jagirani M.S., Ozalp O., Soylak M. New Trend in the Extraction of Pesticides from the Environmental and Food Samples Applying Microextraction Based Green Chemistry Scenario: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2022; 52(6): 1343–1369. <https://doi.org/10.1080/10408347.2021.1874867>
87. Galmiche M., Delhomme O., François Y.-N., Millet M. Environmental analysis of polar and non-polar Polycyclic Aromatic Compounds in airborne particulate matter, settled dust and soot: Part II: Instrumental analysis and occurrence. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2021; 134: 116146. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116146>

88. Rawash E.-S.A., Mohamed G.G., Souaya E.R., Khalil L.H., El-Chaghaby G.A., El-Gammal M.H. Distribution and Health Hazards of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Egyptian Milk and Dairy-Based Products. *Beverages*. 2018; 4(3): 63. <https://doi.org/10.3390/beverages4030063>
89. Hasan G.M.M.A., Ali Shaikh M.A., Satter M.A., Hossain M.S. Detection of indicator polychlorinated biphenyls (I-PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in cow milk from selected areas of Dhaka, Bangladesh and potential human health risks assessment. *Toxicology Reports*. 2022; 9: 1514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.07.008>
90. Rincón J.C. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in four milk brands sold in Mexico City: evaluating three fat extraction methods. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2019; 10(4): 1064–1076. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4763>
91. Kishikawa N., Wada M., Kuroda N., Akiyama S., Nakashima K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography B*. 2003; 789(2): 257–264. [https://doi.org/10.1016/S1570-0232\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S1570-0232(03)00066-7)
92. Yan K., Wu S., Gong G., Xin L., Ge Y. Simultaneous Determination of Typical Chlorinated, Oxygenated, and European Union Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Milk Samples and Milk Powders. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021; 69(13): 3923–3931. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00283>
93. Sun Y., Yan K., Wu S., Gong G. Occurrence, spatial distribution and impact factors of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milks from nine countries. *Food Control*. 2020; 113: 107197. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107197>
94. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. A headspace solid-phase microextraction procedure coupled with gas chromatography–mass spectrometry for the analysis of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008; 391(3): 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-1841-2>
95. Girelli A.M., Sperati D., Tarola A.M. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in Italian milk by HPLC with fluorescence detection. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014; 31(4): 703–710. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.878959>
96. Dobrinás S., Soceanu A., Popescu V., Coatu V. Polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides in milk powder. *Journal of Dairy Research*. 2016; 83(2): 261–265. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000169>
97. Hollosi L., Wenzl T. Development and optimisation of a dopant assisted liquid chromatographic-atmospheric pressure photo ionisation-tandem mass spectrometric method for the determination of 15 + 1 EU priority PAHs in edible oils. *Journal of Chromatography A*. 2011; 1218(1): 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.015>
98. Hernández-Arteseros J.A., Beltrán J.L., Compañó R., Prat M.D. Fast-scanning fluorescence spectroscopy as a detection system in liquid chromatography for confirmatory analysis of flumequine and oxolinic acid. *Journal of Chromatography A*. 2002; 942(1–2): 275–281. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)01359-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)01359-0)
99. Bertoz V., Purcaro G., Conchione C., Moret S. A Review on the Occurrence and Analytical Determination of PAHs in Olive Oils. *Foods*. 2021; 10(2): 324. <https://doi.org/10.3390/foods10020324>
100. Avagyan R., Nyström R., Boman C., Westerholm R. Determination of hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons by HPLC-photoionization tandem mass spectrometry in wood smoke particles and soil samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015; 407(16): 4523–4534. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8638-x>
101. Luque-Uría Á., Espinosa-Mansilla A., Durán-Merás I. Hplc-Fast Scanning Fluorimetric Detection Determination of Risk Exposure to Polycyclic Aromatics Hydrocarbons Biomarkers in Human Urine. *Bioanalysis*. 2017; 9(3): 265–278. <https://doi.org/10.4155/bio-2016-0125>
102. Martín-Tornero E., Luque-Uría A., Durán-Merás I., Espinosa-Mansilla A. A novel analytical methodology for the determination of hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons in breast and cow milk samples. *Journal of Chromatography B*. 2020; 1136: 121912. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2019.121912>
103. Santonicola S. *et al.* Comparative study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in breast milk and infant formula and risk assessment. *Chemosphere*. 2017; 175: 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.084>
88. Rawash E.-S.A., Mohamed G.G., Souaya E.R., Khalil L.H., El-Chaghaby G.A., El-Gammal M.H. Distribution and Health Hazards of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Egyptian Milk and Dairy-Based Products. *Beverages*. 2018; 4(3): 63. <https://doi.org/10.3390/beverages4030063>
89. Hasan G.M.M.A., Ali Shaikh M.A., Satter M.A., Hossain M.S. Detection of indicator polychlorinated biphenyls (I-PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in cow milk from selected areas of Dhaka, Bangladesh and potential human health risks assessment. *Toxicology Reports*. 2022; 9: 514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.07.008>
90. Rincón J.C. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in four milk brands sold in Mexico City: evaluating three fat extraction methods. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2019; 10(4): 1064–1076. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i4.4763>
91. Kishikawa N., Wada M., Kuroda N., Akiyama S., Nakashima K. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography B*. 2003; 789(2): 257–264. [https://doi.org/10.1016/S1570-0232\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S1570-0232(03)00066-7)
92. Yan K., Wu S., Gong G., Xin L., Ge Y. Simultaneous Determination of Typical Chlorinated, Oxygenated, and European Union Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Milk Samples and Milk Powders. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021; 69(13): 3923–3931. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00283>
93. Sun Y., Yan K., Wu S., Gong G. Occurrence, spatial distribution and impact factors of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milks from nine countries. *Food Control*. 2020; 113: 107197. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107197>
94. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. A headspace solid-phase microextraction procedure coupled with gas chromatography–mass spectrometry for the analysis of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008; 391(3): 753–758. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-1841-2>
95. Girelli A.M., Sperati D., Tarola A.M. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in Italian milk by HPLC with fluorescence detection. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014; 31(4): 703–710. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.878959>
96. Dobrinás S., Soceanu A., Popescu V., Coatu V. Polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides in milk powder. *Journal of Dairy Research*. 2016; 83(2): 261–265. <https://doi.org/10.1017/S0022029916000169>
97. Hollosi L., Wenzl T. Development and optimisation of a dopant assisted liquid chromatographic-atmospheric pressure photo ionisation-tandem mass spectrometric method for the determination of 15 + 1 EU priority PAHs in edible oils. *Journal of Chromatography A*. 2011; 1218(1): 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.015>
98. Hernández-Arteseros J.A., Beltrán J.L., Compañó R., Prat M.D. Fast-scanning fluorescence spectroscopy as a detection system in liquid chromatography for confirmatory analysis of flumequine and oxolinic acid. *Journal of Chromatography A*. 2002; 942(1–2): 275–281. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)01359-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)01359-0)
99. Bertoz V., Purcaro G., Conchione C., Moret S. A Review on the Occurrence and Analytical Determination of PAHs in Olive Oils. *Foods*. 2021; 10(2): 324. <https://doi.org/10.3390/foods10020324>
100. Avagyan R., Nyström R., Boman C., Westerholm R. Determination of hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons by HPLC-photoionization tandem mass spectrometry in wood smoke particles and soil samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015; 407(16): 4523–4534. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8638-x>
101. Luque-Uría Á., Espinosa-Mansilla A., Durán-Merás I. Hplc-Fast Scanning Fluorimetric Detection Determination of Risk Exposure to Polycyclic Aromatics Hydrocarbons Biomarkers in Human Urine. *Bioanalysis*. 2017; 9(3): 265–278. <https://doi.org/10.4155/bio-2016-0125>
102. Martín-Tornero E., Luque-Uría A., Durán-Merás I., Espinosa-Mansilla A. A novel analytical methodology for the determination of hydroxy polycyclic aromatic hydrocarbons in breast and cow milk samples. *Journal of Chromatography B*. 2020; 1136: 121912. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2019.121912>
103. Santonicola S. *et al.* Comparative study on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in breast milk and infant formula and risk assessment. *Chemosphere*. 2017; 175: 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.084>

104. García Londoño V.A., Reynoso C.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Uruguay. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2017; 10(4): 284–291. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1349191>
105. Chung T.-L., Liao C.-J., Chen M.-F. Comparison of liquid–liquid extraction and solid-phase extraction for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the milk of Taiwan. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2010; 41(2): 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.07.003>
106. Grova N. *et al.* Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Levels in Milk Collected Near Potential Contamination Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002; 50(16): 4640–4642. <https://doi.org/10.1021/jf0201071>
107. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and related products using solid-phase microextraction coupled to gas chromatography–mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 2007; 596(2): 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.06.005>
108. Lin W., Wei S., Jiang R., Zhu F., Ouyang G. Calibration of the complex matrix effects on the sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples using solid phase microextraction. *Analytica Chimica Acta*. 2016; 933: 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.05.045>
109. Iwegbue C.M.A., Bassey F.I. Concentrations and health hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons in selected commercial brands of milk. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2013; 7(4): 177–184. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9153-4>
110. Viteri F., Sánchez N.E., Alexandrino K. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Leaf and Bark Samples of *Sambucus nigra* Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). *Methods and Protocols*. 2023; 6(1): 17. <https://doi.org/10.3390/mps6010017>
111. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., García-Falcón M.S., González-Barreiro C., Simal-Gándara J. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons and their hydroxylated metabolites in infant foods. *Food Chemistry*. 2009; 115(3): 814–819. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.095>
112. Naccari C., Cristani M., Giofrè F., Ferrante M., Siracusa L., Trombetta D. PAHs concentration in heat-treated milk samples. *Food Research International*. 2011; 44(3): 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.029>
113. Rey-Salgueiro L., García-Falcón M.S., Martínez-Carballo E., Simal-Gándara J. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread. *Food Chemistry*. 2008; 108(2): 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.026>
114. García Londoño V.A., García L.P., Scussel V.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Argentina and Brazil. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2013; 30(9): 1573–1580. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.810347>
104. García Londoño V.A., Reynoso C.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Uruguay. *Food Additives & Contaminants: Part B*. 2017; 10(4): 284–291. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1349191>
105. Chung T.-L., Liao C.-J., Chen M.-F. Comparison of liquid–liquid extraction and solid-phase extraction for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the milk of Taiwan. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2010; 41(2): 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.07.003>
106. Grova N. *et al.* Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Levels in Milk Collected Near Potential Contamination Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002; 50(16): 4640–4642. <https://doi.org/10.1021/jf0201071>
107. Aguinaga N., Campillo N., Viñas P., Hernández-Córdoba M. Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and related products using solid-phase microextraction coupled to gas chromatography–mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 2007; 596(2): 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.06.005>
108. Lin W., Wei S., Jiang R., Zhu F., Ouyang G. Calibration of the complex matrix effects on the sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples using solid phase microextraction. *Analytica Chimica Acta*. 2016; 933: 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.05.045>
109. Iwegbue C.M.A., Bassey F.I. Concentrations and health hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons in selected commercial brands of milk. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2013; 7(4): 177–184. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9153-4>
110. Viteri F., Sánchez N.E., Alexandrino K. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Leaf and Bark Samples of *Sambucus nigra* Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). *Methods and Protocols*. 2023; 6(1): 17. <https://doi.org/10.3390/mps6010017>
111. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., García-Falcón M.S., González-Barreiro C., Simal-Gándara J. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons and their hydroxylated metabolites in infant foods. *Food Chemistry*. 2009; 115(3): 814–819. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.095>
112. Naccari C., Cristani M., Giofrè F., Ferrante M., Siracusa L., Trombetta D. PAHs concentration in heat-treated milk samples. *Food Research International*. 2011; 44(3): 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.029>
113. Rey-Salgueiro L., García-Falcón M.S., Martínez-Carballo E., Simal-Gándara J. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread. *Food Chemistry*. 2008; 108(2): 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.026>
114. García Londoño V.A., García L.P., Scussel V.M., Resnik S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk powders marketed in Argentina and Brazil. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2013; 30(9): 1573–1580. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.810347>

ОБ АВТОРАХ

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

Озлем Пелин Кан³
доктор философских наук, профессор кафедры гигиены и технологии пищевых продуктов факультета ветеринарной медицины
opcan@cumhuriyet.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1179-4227>

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

²Южно-Уральский государственный университет,
пр-т им. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

³Университет Сивас Джумхуриет,
Кампус университета, Сивас, 58140, Турция

ABOUT THE AUTHORS

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

Özlem Pelin Can³
Doctor of Philosophy, Professor, Department of Hygiene and Food Technology, Faculty of Veterinary Medicine
opcan@cumhuriyet.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1179-4227>

¹South Ural State Agrarian University,
13 Gagarin Str., Troitsk, 457100, Russia

²South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia

³Sivas Cumhuriyet University,
Campus Central Sivas, Sivas, 58140, Türkiye

УДК 338.43

Научный обзор



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-187-197

Л.Н. Рождественская

Уральский государственный
экономический университет,
Екатеринбург, Россия

✉ lada2006job@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.07.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Рождественская Л.Н.

Здоровое устойчивое питание как драйвер трансформации продовольственных систем

РЕЗЮМЕ

Трансформация продовольственных систем обусловлена вызовами при обеспечении устойчивости, продовольственной безопасности и здоровьесбережения населения. Появление новых решений при разработке пищевых ингредиентов и продуктов должно учитывать необходимость рационального использования как традиционных, так и новых источников пищевых веществ и опираться на инновационные решения на стадиях производства, распределения и упаковки.

Цель обзора — обоснование основных возможностей и вызовов при создании новых пищевых матриц.

Материалами исследования выступили документы стратегического уровня ВОЗ и ФАО, научная литература и из высокорейтинговых журналов предметной области за 2015–2025 гг. В рамках данного исследования были применены логические и аналитические методы, такие как индукция, синтез, структурирование, причинно-следственный и описательный анализ. В исследовании рассмотрены основные группы продовольствия, технические и технологические решения, используемые для их производства, особенности нормативно-организационных решений. Представлен международный и отечественный опыт разработки новых пищевых ингредиентов и создания пищевых матриц, изучены сформировавшиеся в этой области методологические подходы и практики внедрения информационных технологий. Выделены стратегические направления научного обеспечения реализации государственной политики РФ в области оптимизации питания населения. Обобщенная информация о трансформации продовольственных систем с целью обеспечения доступа к здоровому устойчивому питанию позволила выделить перспективные направления и цели создания новых пищевых продуктов (матриц) и ингредиентов, а также обозначить потенциальные проблемные области.

Ключевые слова: продовольственная система, новые продукты, пищевая матрица, пищевая комбинаторика, пищевые ингредиенты

Для цитирования: Рождественская Л.Н. Здоровое устойчивое питание как драйвер трансформации продовольственных систем. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 187–197. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-187-197>

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-187-197

Lada N. Rozhdestvenskaya

State University of Economics,
Ekaterinburg, Russia

✉ lada2006job@mail.ru

Received by the editorial office: 15.07.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© Rozhdestvenskaya L.N.

Healthy Sustainable Nutrition as a Driver of Transformation of Food Systems tools

ABSTRACT

The transformation of food systems is driven by challenges in ensuring sustainability, food security, and public health. The emergence of new solutions in the development of food ingredients and products should take into account the need for the rational use of both traditional and new sources of nutrients and rely on innovative solutions at the stages of production, distribution and packaging.

The purpose of the review is to substantiate the main opportunities and challenges in creating new food matrices.

The research materials were WHO and FAO strategic level documents, scientific literature and highly rated journals in the subject area for 2015–2025. Logical and analytical methods such as induction, synthesis, structuring, causal and descriptive analysis were used in this study. The study examines the main food groups, the technical and technological solutions used for their production, and the specifics of regulatory and organizational solutions. International and domestic experience in the development of new food ingredients and the creation of food matrices is presented, methodological approaches and information technology implementation practices have been developed in this area. The strategic directions of scientific support for the implementation of the state policy of the Russian Federation in the field of optimizing nutrition of the population are highlighted. The generalized information on the transformation of food systems in order to ensure access to healthy, sustainable nutrition made it possible to identify promising areas and goals for the creation of new food products/matrix and ingredients, as well as identify potential problem areas.

Key words: food system, novel food, food matrix, food combinatorics, food ingredients

For citation: Rozhdestvenskaya L.N. Healthy Sustainable Nutrition as a Driver of Transformation of Food Systems. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 187–197 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-187-197>

Введение/Introduction

Модели питания и, как следствие, пищевой статус населения непосредственно зависят от состояния продовольственной безопасности. Доступность и достаточность основных продовольственных групп населению и обеспечение основного объема ресурсов, направляемых на покрытие потребностей за счет отечественного сельского хозяйства и АПК, — приоритеты, отмеченные в целом ряде нормативно-правовых документов Российской Федерации^{1–5} и обеспечения продовольственной безопасности, являются основополагающим условием при рассмотрении вопросов устойчивого развития страны [1], особенно с учетом особенностей санкционного режима [2].

Проблемы продовольственной и пищевой безопасности и их воздействие на здоровье населения и планеты носят комплексный, взаимосвязанный, трансграничный характер. Глобальная концепция продовольственной безопасности⁶ отражает базовые шесть аспектов, которые в свою очередь коррелируют с принципами здорового питания:

- субъектность (для всех и соответствие индивидуальным пищевым потребностям);
- стабильность и устойчивость (в краткосрочном периоде это отражает физическую доступность, связанную с непосредственным наличием, в долгосрочной перспективе — определяется потенциалом и особенностями продовольственной системы);
- доступ и наличие (социальная и экономическая доступность продовольствия в достаточных количествах);
- использование (соответствие назначению — вкусовым предпочтениям, критериям безопасности и питательности — содержанию необходимых пищевых веществ).

В свою очередь, эти принципы продовольственной безопасности обуславливают шесть качеств устойчивой продовольственной системы:

- продуктивность и благополучие (через обеспечение наличия достаточного количества продовольствия);
- справедливость и инклюзивность (гарантированный доступ к продовольствию и средствам к существованию в системе всем людям);

- ориентация на уважение к людям и расширение их прав и возможностей (предоставление возможности принимать решения и высказывать мнения, влияющие на систему для всех групп людей);

- стойкость к внешним воздействиям (стабильность системы в ситуациях кризисов и потрясений);

- ориентация на восстановительные методы хозяйствования (использование полного спектра аспектов, обеспечивающих устойчивость);

- ориентация на здоровую и питательную пищу (с целью достижения наиболее полного использования и усвоения человеком питательных веществ).

Перечисленные выше качества и принципы современной продовольственной системы обуславливают перспективные направления ее трансформации.

Цель данной работы — обоснование основных возможностей и вызовов в создании новых пищевых матриц в условиях глобальной трансформации продовольственных систем.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для достижения поставленных целей в исследовании использован комплекс взаимодополняющих методов и подходов. Концептуальную основу составили анализ документов, определяющих стратегические направления развития глобальной продовольственной системы ВОЗ⁷ и ФАО⁸, научная литература и из высокорейтинговых журналов предметной области (с импакт-фактором от 2,5) за 2015–2025 гг. Это позволило выявить основные тренды в разработке новых видов пищевых продуктов и использовании новых источников пищевых веществ с учетом акцентов на здоровое устойчивое питание. Теоретический фундамент исследования опирается на синтез концепций устойчивого развития, пищевой матрицы, нутриентной плотности и концептуальной модели продовольственной системы.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На уровне консолидированного решения международного сообщества (ФАО) отмечается, что создание и поддержка устойчивости агропродовольственных систем предполагают ряд изменений на социально-экономическом и экологическом

¹ Президент Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 года № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». 2020.

² Концепция повышения продовольственной безопасности государств — участников СНГ, утверждена Решением Совета глав правительств СНГ от 19 ноября 2010 года.

³ Президент Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 года № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года». 2020.

⁴ Федеральный закон от 2 января 2000 года № 29-ФЗ (ред. от 13 июля 2020 года) «О качестве и безопасности пищевых продуктов». 2020.

⁵ Правительство РФ. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 29 июня 2016 года № 1364-р. 2016.

⁶ ГЭВУ. Доклад группы экспертов высокого уровня по вопросам продовольственной безопасности и питания: создание глобальной концепции продовольственной безопасности и питания на период до 2030 года. Материалы сессии «Новый взгляд на продовольственную безопасность и питание». Рим: Комитет по всемирной продовольственной безопасности. 2020. — URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ne664ru>

⁷ <https://www.who.int/ru>

⁸ <https://www.fao.org/home/ru>

уровнях, осуществляемых на основе четырех «триггеров преобразований»: совершенствование управления; критически настроенные и информированные потребители; улучшение распределения доходов и богатства, инновационные технологии и подходы⁹.

Анализ научных исследований в последнем блоке трансформирующих триггеров демонстрирует значительный прогресс при использовании инноваций и прогрессивных технологий, позволяющих не только находить уникальные решения на этапах производственной цепи продовольственной системы, но и отличающихся с позиций заложенных целевых результатов. На каждом из этапов возможно как создание новых видов сырьевых источников и продуктов, так и значительное улучшение качественных характеристик пищевой продукции или появление новых свойств, имеющих значимое для здоровья человека воздействие.

Так, например, для этапа сельскохозяйственного производства и формирования пищевого сырьевого ресурса особой актуальностью отличаются создание принципиально новых сырьевых источников, использование отходов других пищевых производств и биофортификация. Если рассматривать новые источники пищевых веществ, то чаще всего речь идет о нетрадиционных или ограниченно используемых в питании видах растений, животных, насекомых, грибов, бактерий и пр. В документах ФАО в ближайшей перспективе оговаривается создание агропродовольственными системами следующих основных групп продовольствия^{10–12}:

- 1) традиционные продукты;
- 2) продукты, полученные на основе новых технологических процессов, в том числе синтезированные;
- 3) продукты, полученные на основе генно-инженерно-модифицированных организмов (ГМО) растительного, животного и микробного происхождения с улучшенными агрономическими (устойчивость к пестицидам, вредителям, вирусам и т. п.), пищевыми (измененный состав макро-нутриентов, источники витаминов и минеральных веществ, гипоаллергенные продукты) и потребительскими (высокие органолептические свойства, длительный срок хранения и т. п.) свойствами;
- 4) продукты, полученные на основе использования нетрадиционных пищевых ресурсов (аквакультура, насекомые, микроорганизмы, микроскопические грибы и пр.) [3, 4].

Все вышеперечисленные тренды приводят к необходимости появления новых регламентов

и НПА, регулирующих создание новых блюд на основе использования подобного сырья. Novel Food — это пища, которая не имеет значительной истории потребления или производится способом, который ранее не использовался для употребления в пищу. Это тип новых продуктов питания, которых раньше не было ни на одном региональном или глобальном потребительском рынке, которые разрабатываются на основе использования биотехнологических (биоинженерных) методов [5].

В разных странах вопрос применения новых сырьевых источников или расширение сферы применения известных имеют разную нормативно-организационную основу. Так, активное развитие индустрии питания и здоровья в Китае привело к созданию специальных информационных ресурсов по спецификации нового пищевого сырья в целях его ежегодного пересмотра, дальнейшего утверждения целей использования, стандартизации и лицензирования [6].

В США новые продукты питания не выделяются в отдельную категорию, а регулируются как продукты питания независимо от их технологических, временных или географических условий производства на основе баланса между инновациями и общественной безопасностью. При этом новый пищевой ресурс или пищевой ингредиент в зависимости от его предполагаемого использования должен быть одобрен Управлением по контролю за продуктами питания и лекарственными средствами (FDA) в качестве пищевой добавки или через подтверждение общепризнанного безопасного содержания (Generally Recognized As Safe, GRAS) для использования в конкретных целях [7].

В FDA контролирует регулирование новых продуктов питания, Структура FDA включает такие механизмы, как обозначение, которое упрощает процесс одобрения определенных новых продуктов питания

В Европе для определения статуса Novel Food, к которым относят новые пищевые продукты или новые пищевые ингредиенты, не имеющие истории «значительного» потребления в Европейском союзе до 15 мая 1997 года, создаются новые каталоги¹³ и новые пищевые технические регламенты. В них оговаривается, что продукты питания и пищевые ингредиенты, подпадающие под действие этого регламента, не должны:

- представлять опасности для потребителя,
- вводить в заблуждение потребителя,
- отличаться от пищевых продуктов или пищевых ингредиентов, которые они предназначены

⁹ FAO. Transforming agri-food systems in an evolving socio-economic, political, and environmental context. Report of the Internal Expert Consultation, June — October 2020. Рим.

¹⁰ FAO. Transforming agri-food systems in an evolving socio-economic, political, and environmental context. Report of the Internal Expert Consultation, June — October 2020. Рим.

¹¹ FAO. The future of food and agriculture: Trends and challenges. Rome: FAO. 2017; 180. ISBN 978-92-5-109551-5

¹² FAO. How to Feed the World in 2050. — URL: <http://www.fao.org/>

¹³ Союзный список новых продуктов питания.

— URL: https://ec.europa.eu/food/safety/novel-food/authorisations/union-list-novel-foods_en (accessed: 10.02.2025).

заменить до такой степени, что их нормальное потребление будет неблагоприятно для потребителя с точки зрения питания¹⁴.

В Канаде новые продукты регулируются в соответствии со следующими атрибутами: продукты, которые никогда не использовались в качестве еды; пища, полученная в результате процесса, который ранее не использовался в пищу; пища, которая подверглась генетической модификации и имеет новые черты¹⁵.

Исторически выделяются три основные исследовательские перспективы в разработке новых пищевых продуктов. Первая из них — технологическая, обусловленная развитием научно-технического прогресса, была основным двигателем ранних исследований и инноваций (например, открытие замораживания, пастеризации и т. д.). Вторая перспектива — рыночно ориентированный подход, инициирована возросшей конкуренцией и созданием такой области знаний, как маркетинг (создание торговых сетей, реклама и продвижение, упаковка и мерчандайзинг и пр.). В последние десятилетия — разработка новых продуктов, ориентированная на потребности и особенности конечного потребителя (персонализация, учет особых потребностей, пищевая ценность и усвояемость). Факторы технологической и потребительской эффективности продукта традиционно определялись учеными, изучающими продукты питания и потребителей, в то время как рыночно ориентированный подход был частью области маркетинга и менеджмента. Однако необходимость интеграции маркетинга, исследований потребителей и пищевых технологий для улучшения характеристик новых пищевых продуктов была признана и обсуждена в существующей научной литературе [8].

Таким образом, трансформация продовольственной системы предполагает возможность создания уникальных новых решений на любом из этапов пищевой цепи. В научной литературе имеется описание множественных решений и новаций в области создания: нового пищевого ресурса (источника) [9, 10]; новых пищевых ингредиентов [11, 12]; новых пищевых продуктов (матриц) [13, 14].

Наиболее часто используемые для этого технические и технологические решения опираются на использование генной модификации, различных вариантов обогащения и фортификации, ферментационные процессы как естественным путем за счет содержащихся в продукте компонент, так и путем добавления в пищевую систему определенных штаммов живых микроорганизмов или ранее полученных на биопроизводствах ферментов.

В рамках данной работы наибольший интерес представляет третье направление — разработка (перекombинирование, изменение рецептур и

(или) технологии производства) в целях создания новых пищевых продуктов.

Отечественный опыт в области создания и медико-биологических исследований новых источников пищи начал формироваться с 60-х годов прошлого столетия, когда под руководством академика А.А. Покровского группой советских ученых были разработаны подходы к определению биологической ценности и безвредности белковых продуктов микробиологического синтеза. В тот период был создан белок, предназначенный для кормления сельскохозяйственных животных, получаемый при выращивании дрожжей на основе парафинов нефти, этанола, метанола и других субстратов [15].

В научных работах отечественных ученых подходы к выделению новых видов сырьевых ресурсов и продуктов отличаются. Так, в работе Н.В. Тишко *и соавт.* рассмотрены преимущественно генно-инженерно-модифицированные организмы растительного происхождения [16].

Первое направление генной модификации растений — это расширение ассортимента продовольственных культур как в отношении создания условий расширения ареала выращивания, так и потенциала использования за счет придания новых полезных качественных характеристик. Второе направление заключается в создании растений с измененным способом фотосинтеза (изменение фотосинтетического аппарата), что позволит повысить эффективность использования азота, воды, а также обеспечить устойчивость к высоким температурам.

В обзоре Б.Ч. Месхи *и соавт.* выделены следующие группы новых продуктов питания: синтезированные и ГМО продукты, продукты диетического питания и функциональные продукты, продукты растительного происхождения (вегетарианские) и ферментированные продукты [17].

Разработка новых пищевых продуктов представляет собой комплексный междисциплинарный процесс, включающий исследование потребительского спроса, создание и введение в пищевую систему инновационных ингредиентов, технологические решения и обеспечение безопасности конечного продукта. Интеграция классических методик разработки новых продуктов опирается на использование подходов: конструирования, пищевой комбинаторики, цифровой нутрициологии, броматологии, квалиметрии, машинного обучения и нейронных сетей, что позволяет оперативно адаптировать рецептуры для современных требований рынка, повышая эффективность R&D и снижая риски при выведении продукции на рынок.

Разработка новых продуктов предполагает совокупное использование целого ряда методологических инструментов и подходов. Классические

¹⁴ Regulation (EC) No 258/97 of the European Parliament and of the Council of 27 January 1997 concerning novel foods and novel food ingredients — consolidated version of 7.08.2009.

¹⁵ Factsheets and Frequently Asked Questions — Genetically Modified Foods and Other Novel Foods. aem. Health Canada. 27 July 2003.

системы разработки новых пищевых продуктов формировались в разных странах и объединили опыт научно обоснованных принципов и подходов к конструированию пищевых продуктов¹⁶, этапов разработки — от формулирования общей бизнес-стратегии до агрегации необходимых знаний, умений и навыков^{17, 18}.

Отечественными основоположниками направления «Пищевая комбинаторика» являются А.М. Бражников, И.А. Рогов, Н.Н. Липатов. В их трудах обоснованы основные принципы пищевой комбинаторики, теоретические и практические основы конструирования пищевых продуктов, предложены формализованные методы математического моделирования. Базовая пищевая комбинаторика является методом конструирования новых пищевых продуктов с заданными органолептическими, физико-химическими и иными характеристиками посредством введения пищевых и биологически активных добавок для достижения необходимых целевых или нормируемых значений показателей [18–20].

В современных исследованиях пищевая комбинаторика используется в гипотезе совпадения ароматических соединений, опирающейся на положение о том, что продукты, содержащие сходные летучие соединения, имеют гармоничные вкусовые сочетания [21]. Этот подход реализуется на основе специальных баз данных (Volatile Compounds in Food, VCF) [22] и методов химической сенсорики для системного подбора ингредиентов при создании пищевого продукта [23].

Существует целая группа исследований, направленных на разработку новых пищевых продуктов и ингредиентов для них на основе развертывания функции качества (Quality Function Deployment, QFD) и квалитетического прогнозирования [24, 25], в том числе использование цепной информационной модели (CIM) [26] или управление цепочками поставок [27], планирование экспериментов (Design of Experiments, DoE) [28, 29] и анализ затрат и выгод (Cost-Benefit Analysis, CBA) [30].

QFD обеспечивает ориентацию на требования потребителей, что демонстрируется многочисленными примерами использования квалитетического подхода к разработке структурированных молочных продуктов [31], мучных блюд с растительными заменителями молока [32], салатов [33], мясных продуктов [34], кондитерских изделий [35] и пр. Планирование экспериментов DoE оптимизирует параметры рецептуры и процесса [36], а соотношение затрат (результатов) CBA позволяет оценить финансовую целесообразность разработанной новой пищевой продукции.

С развитием цифровой нутрициологии, объединившей IT-технологии, биоинформатику и нутрициологию, появились инструменты, позволяющие не только конструировать новые продукты, но и учитывать изменения, происходящие в конечном продукте в ходе технологических операций, трансформирующих сырьевые компоненты [37, 38]. Следующим этапом развития цифровой нутрициологии становится появление цифровых профилей [39] (математические модели, объединяющие ингредиентные и нутриентные матрицы, показатели физико-химических и органолептических свойств) и цифровых двойников продуктов [40, 41].

Разработка цифрового двойника конструируемого пищевого продукта позволяет: прогнозировать состав и свойства будущего продукта; управлять его параметрами и характеристиками на разных этапах жизненного цикла [42]; трансформировать рецептуру при масштабировании производства или адаптации к новому оборудованию; соотносить соответствие продукта маркетинговым заявлениям или нормативным требованиям [43], обосновывать экспериментальные решения по обеспечению показателей безопасности пищевых продуктов [44].

В настоящем вектор исследований в области пищевой комбинаторики смещен в сторону расширенного цифрового профилирования, что предполагает создание математических моделей, отвечающих на воздействия виртуальных факторов не только с учетом трансформации нутриентов в процессе производства, но и с возможностью прогнозирования процессов усвоения в организме, что особенно важно при создании продуктов для персонализированного питания с учетом генетической предрасположенности [45].

Отмечая тенденции в области разработки новых продуктов питания, следует отметить, что, кроме процессов, ведущих к появлению принципиально новых пищевых матриц, происходит и изменение подходов к основным (базовым) продуктам питания. Это предполагает осуществление системных воздействий на изменение характеристик пищевой продукции, имеющей исторически сложившиеся значительные объемы потребления и решающее место в сложившемся рационе населения (рис, пшеница, молоко и пр.), а также создание новых продуктов на основе изменения технологических аспектов, приводящих к появлению новых эффектов от употребления привычных пищевых продуктов, которых ранее у них не было.

Новые основные продукты питания (Novel staple foods, NVSFs) — это основные продукты питания,

¹⁶ Лисицын А.Б., Чернуха И.М., Никитина М.А. Конструирование многокомпонентных продуктов питания. М.: МГУПП. 2021; 176. ISBN: 978-5-9920-0364-2

¹⁷ Эрл М., Эрл Р., Андерсон А. Разработка пищевых продуктов. СПб.: Профессия. 2007; 384.

¹⁸ Deschenes K., Aramouni F. Methods of Food Product Development: An Instructional Guide. Destech Pubns Inc. 2014; 378. ISBN: 978-1605951126

которые модифицируются с целью улучшения их питательных свойств. Например, такие решения, обеспечивающие более здоровую альтернативу пациентам с диабетом 2-го типа (СД2), как под-вергнутый сортовой или генетической модификации, обогащенный клетчаткой белый рис [46], обогащенный антоцианами для ингибирования карбогидразы хлеб или микрофлюидная гелевая лапша с уменьшенным содержанием доступных углеводов [47].

Другим примером является производство в целях улучшения здоровья и развития женщин и детей в странах Африки к югу от Сахары продуктов на основе проса, сорго, кукурузы и маниоки с увеличенным содержанием микроэлементов в этих основных продуктах питания [48] на основе разработанных подходов в области биофортификации, фортификации и переработки. По сути, эта тенденция отражает новый виток технологий, направленных на массовую и целевую фортификацию [49] и обогащение химического состава продуктов, составляющих значительную часть рациона [50].

Среди выделяемых в исследованиях ведущих российских специалистов стратегических направлений научного обеспечения реализации государственной политики РФ в области оптимизации питания населения [51, 52] предусмотрены:

- обеспечение целей в области импортозамещения и оптимизации питания населения в части восполнения дефицита белка и микронутриентов, снижения калорийности и увеличения пищевой плотности рациона путем насыщения отечественного рынка пищевой продукцией с заданным химическим составом и свойствами;
- при производстве продукции с высоким содержанием полноценного легкоусвояемого белка расширение ресурсного потенциала пищевой и перерабатывающей промышленности РФ, в том числе за счет использования инновационных пищевых ингредиентов из нетрадиционного сырья (насекомые, микроорганизмы, микроскопические грибы и др.);
- расширение практик обязательного или добровольного крупномасштабного обогащения пищевых продуктов для увеличения доли присутствия на рынке обогащенных витаминами и минералами изделий. Например, согласно «Основам государственной политики России в области здорового питания», хлеба — до 50% от общего объема выпуска;
- развитие и повсеместное внедрение биофортификации с целью повышения микронутриентной ценности пищевой продукции путем селекции растений или животных, использования генно-инженерных технологий, внедрения агрономических приемов с использованием удобрений или опрыскивания растений, обогащения кормов сельскохозяйственных животных микронутриентами;

- увеличение на рынке Российской Федерации доли профилактических пищевых продуктов с заданным химическим составом с использованием в рецептурах пищевых волокон, витаминopodobных и минорных компонентов пищи, обладающих антиоксидантными свойствами;

- законодательное закрепление обогащения витамином *D* и витаминами группы *B* пищевых продуктов массового потребления;

- осуществление реализации образовательных программ в области здорового образа жизни, в том числе питания как основы здоровьесбережения и улучшения качества жизни россиян.

Поскольку пищевая цепь как компонент продовольственной системы включает непосредственно создание пищевого ресурса, его хранение и дистрибьюцию, переработку и упаковку, продажу и распределение, переработку (утилизацию) отходов, то трансформация продовольственной системы предполагает возможность осуществления изменений на каждом из этапов пищевой цепи [53–56]. С этой точки зрения могут появляться как новые пищевые ресурсы, так и новые технологии хранения, переработки, упаковки и переработки отходов с максимальным акцентом на ресурсосбережении [57–59].

Важно отметить, что, помимо производственных этапов уровня создания пищевого ресурса или его переработки, не менее важные изменения продовольственной системы реализованы и на таких этапах трансформации пищевой цепи, как хранение и упаковка, распределение и потребление. Каждый из этих этапов имеет множество специфических особенностей, что обуславливает актуальность разнонаправленных научных исследований [60–64].

Наибольшее развитие научной мысли при решении вопросов хранения и упаковки разработанных новых пищевых матриц получили такие направления исследований, как газомодифицированные барьерные среды, использование ионизирующего излучения, озонирование, УЗИ-обработка, обработка плазмой и др. [65, 66]. Значительный интерес представляют появление новых биоразлагаемых покрытий и (или) съедобных покрытий, использование механизмов нанонапыления и нанопакетов [67–69].

Поскольку люди выбирают продукты, то модель питания — это совокупность принятых в отношении выбора пищевых продуктов решений [70, 71]. Влияние на эти решения на этапах распределения и потребления осуществляется через формирование и управление поведением потребителей.

Как указывалось выше, для системного воздействия на рацион и направленного изменения поведения потребителей необходимо принятие политических, программных и институциональных мер, направленных на товаропроизводящие цепи, продовольственную среду, информационное обеспечение и пропаганду.

Выводы/Conclusions

Таким образом, обобщая информацию о трансформации продовольственных систем с целью обеспечения доступа к здоровому устойчивому питанию, можно отметить, что к основным перспективным направлениям создания новых пищевых продуктов (матриц) и ингредиентов можно отнести:

- комбинирование новых пищевых матриц из отдельных ингредиентов как существующих или синтезированных аналогов, так и вновь созданных;
- извлечение отдельных ингредиентов или существенное снижение их содержания в пищевой системе;
- введение новых ингредиентов в существующие матрицы или существенное увеличение содержания этих ингредиентов в них;
- технологическое воздействие на пищевые матрицы с целью появления новых связей или биодеструкции содержащихся связей или нутриентов;
- введение в пищевую матрицу биоорганизмов с целью изменения на уровне метаболических процессов или биоконверсии существующих в базовой пищевой матрице ингредиентов.

При реализации этих подходов наиболее часто используются химический и микробный синтез, 3D-печать, биодеструкция и биоконверсия, механико-химические воздействия.

Технологии биоконверсии и биодеструкции предполагают использование одного из трех вариантов:

- внесение в отдельные компоненты либо пищевую систему одного или нескольких ферментов, полученных в ходе переработки продуктов жизнедеятельности микроорганизмов;
- внесение непосредственно в пищевые матрицы колоний пищевых микроорганизмов как культивируемых определенных штаммов, в том числе штаммов, полученных с помощью генной модификации, так и условно «диких»;
- внесение ферментов, выделенных химическим путем из растений или животных путем переработки их отдельных частей, в том числе несъедобных отходов пищевых производств.

Особенности введения в пищевые матрицы отдельных ингредиентов в процессе создания новых продуктов могут преследовать следующие цели:

- изменение у существующего продукта пищевой ценности или соотношения нутриентов, например белков, жиров и углеводов (к примеру,

получение высокобелковых или низкокалорийных продуктов);

- изменение содержания отдельных биологически активных веществ в пищевой матрице, что формирует в том числе группы функциональных специализированных и обогащенных продуктов. В данном случае предполагается внесение полученных в ходе биоконверсии или экстрагирования компонент (например, биоактивных пептидов);
- направленное изменение пищевой матрицы с технологическими целями или достижение определенных целевых потребительских характеристик качества (запах, вкус, текстура), снижение или отсутствие содержания отдельных компонент (соли сахара), обеспечение пролонгированных сроков хранения или длительное сохранение определенных реологических или технологических характеристик (пористость, пеллоустойчивость, упругость, мягкость);
- достижение определенной эффективности при усвоении продуктов за счет постепенного высвобождения отдельных компонент в процессе пищеварения, в том числе трансферт (доставка) целевых веществ, в определенные отделы кишечника.

Потенциальные проблемы, которые возникают при создании новых пищевых матриц:

- измененная пищевая матрица не всегда однозначно идентифицируется и усваивается организмом, поскольку генетически обусловленные, сложившиеся в ходе эволюции механизмы переваривания адаптированы под определенный продуктовый набор с заданным химическим составом и сочетанием ингредиентов;
- системное употребление отдельных ингредиентов, добавленных в ряд разных продуктов, может давать нежелательные накопительные эффекты для здоровья человека за счет значительного объема совокупного употребления (например, пролонгаторы сроков годности, антиоксиданты, стабилизаторы структуры и прочие технологические добавки);
- в результате системного потребления новых пищевых продуктов происходят изменения микробиома человека и, как следствие, изменение как в протекании метаболических процессов, так и в качестве усвоения рациона, новые экологические вызовы при утилизации отходов новых пищевых продуктов, например продуктов со значительным введением консервантов, изменяющих ход естественного разложения продукции ввиду уничтожения естественной микрофлоры в процессе технологической обработки, хранения и упаковки.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.
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. Томкович А.В. Продовольственная безопасность как элемент устойчивого развития. *Балтийский экономический журнал*. 2022; (4): 11–21.
<https://elibrary.ru/rjwsym>

REFERENCES

1. Tomkovich A.V. Food security as an element of sustainable development. *Baltic Economic Journal*. 2022; (4): 11–21 (in Russian).
<https://elibrary.ru/rjwsym>

2. Сергеев Л.И., Сергеев Д.Л. Особенности воспроизводства общественного продукта в условиях санкций. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика*. 2022; (4): 80–89. <https://doi.org/10.24143/2073-5537-2022-4-80-89>
3. Рождественская Л.Н. Современные тренды и вызовы в индустрии питания. Алакиди А.А. и др. Социально-экономические процессы: новое видение, вызовы, тенденции. Монография. Петрозаводск: *Новая наука*. 2022; 81–125. <https://doi.org/10.46916/04032022-2-978-5-00174-490-0>
4. Arun S., Dattaroy T., Soni B., Dasgupta S. Prospects of novel foods as complete Human Nutrition. *Journal of Food Science and Nutrition Research*. 2021; 4(2): 175–180. <https://doi.org/10.26502/jfsnr.2642-11000070>
5. Calabrese M.G., Ferranti P. Novel Foods: New Food Sources. Ferranti P., Berry E.M., Anderson J.R. (eds.). Encyclopedia of Food Security and Sustainability. *Elsevier*. 2019; 1: 271–275. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22128-8>
6. Xiao C. et al. Research Progress on the Development and Testing Techniques of Novel Food Raw Materials at Home and Abroad. *Food Science*. 2024; 45(14): 312–318 (на кит. яз.). <https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20231012-094>
7. Vapnek J., Purnhagen K.P., Hillel B. Regulatory and Legislative Framework for Novel Foods. Campus Kulmbach Legal Working Paper No. 3/20. *University of Bayreuth*. 2020; 29.
8. Horvat A., Behdani B., Fogliano V., Luning P.A. A systems approach to dynamic performance assessment in new food product development. *Trends in Food Science & Technology*. 2019; 91: 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.036>
9. Мезенова О.Я. Современная пищевая биотехнология: основные проблемы и вызовы. *Вестник Международной академии холода*. 2023; (1): 35–46. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2023-22-1-35-46>
10. Лесникова Н.А., Кокорева Л.А., Пищиков Г.Б., Протасова Л.Г. Перспективы применения нетрадиционного растительного сырья для создания новых продуктов питания. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2019; 81(4): 89–97. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-89-97>
11. Гордеев К.С., Ермолаева Е.Л., Жидков А.А., Илюшина Е.С., Федосеева Л.А. Биологически активные добавки к пище. *Современные научные исследования и инновации*. 2018; (9): 13. <https://elibrary.ru/yakwrf>
12. Гришин Д.В. и др. Биоактивные белки и пептиды: современное состояние и новые тенденции практического применения в пищевой промышленности и кормопроизводстве. *Вопросы питания*. 2017; 86(3): 19–31. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2017-00041>
13. Донник И.М., Кузьмин С.В., Майзель С.Г., Симоненко С.В., Семенова Е.С., Симоненко Е.С. Комплексный подход по реализации полного инновационного цикла производства отечественных адаптированных смесей и лечебного питания. *Пищевая промышленность*. 2022; (11): 16–18. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.003>
14. Кочеткова А.А., Воробьева В.М., Саркисян В.А., Воробьева И.С., Смирнова Е.А., Шатнюк Л.Н. Динамика инноваций в технологии производства пищевых продуктов: от специализации к персонализации. *Вопросы питания*. 2020; 89(4): 233–243. <https://elibrary.ru/sspayq>
15. Тутельян В.А. (ред.). Генетически модифицированные источники пищи: оценка безопасности и контроль. М.: *РАМН*. 2007; 442. ISBN 978-5-7901-0092-5 <https://elibrary.ru/tmfssl>
16. Тышко Н.В., Садыкова Э.О., Шестакова С.И., Аксюк И.Н. Новые источники пищи: от генно-инженерно-модифицированных организмов к расширению биоресурсной базы России. *Вопросы питания*. 2020; 89(4): 100–109. <https://elibrary.ru/xrzqnr>
17. Месхи Б.Ч., Мозговой А.В., Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Саакян С.Р., Мальцева Т.А. Обзор и анализ новых видов продуктов питания. Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО-2022»). *Сборник научных трудов X Юбилейной международной научно-практической конференции с применением дистанционных технологий*. Ростов на-Дону. 2022; 97–102. <https://doi.org/10.23947/itse.2022.97-102>
18. Липатов Н.Н. Предпосылки компьютерного проектирования продуктов и рационов питания с задаваемой пищевой ценностью. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 1995; (3): 4–9.
19. Липатов Н.Н., Рогов И.А. Методология проектирования продуктов питания с требуемым комплексом показателей пищевой ценности. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 1987; (2): 9–15.
2. Sergeev L.I., Sergeev D.L. Characteristics of reproduction of social product in terms of sanctions. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2022; (4): 80–89 (in Russian). <https://doi.org/10.24143/2073-5537-2022-4-80-89>
3. Rozhdestvenskaya L.N. Modern trends and challenges in the food industry. Alakidi A.A. et al. Socio-economic processes: new vision, challenges, trends. Monograph. Petrozavodsk: *Novaya nauka*. 2022; 81–125 (in Russian). <https://doi.org/10.46916/04032022-2-978-5-00174-490-0>
4. Arun S., Dattaroy T., Soni B., Dasgupta S. Prospects of novel foods as complete Human Nutrition. *Journal of Food Science and Nutrition Research*. 2021; 4(2): 175–180. <https://doi.org/10.26502/jfsnr.2642-11000070>
5. Calabrese M.G., Ferranti P. Novel Foods: New Food Sources. Ferranti P., Berry E.M., Anderson J.R. (eds.). Encyclopedia of Food Security and Sustainability. *Elsevier*. 2019; 1: 271–275. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22128-8>
6. Xiao C. et al. Research Progress on the Development and Testing Techniques of Novel Food Raw Materials at Home and Abroad. *Food Science*. 2024; 45(14): 312–318 (in Chinese). <https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20231012-094>
7. Vapnek J., Purnhagen K.P., Hillel B. Regulatory and Legislative Framework for Novel Foods. Campus Kulmbach Legal Working Paper No. 3/20. *University of Bayreuth*. 2020; 29.
8. Horvat A., Behdani B., Fogliano V., Luning P.A. A systems approach to dynamic performance assessment in new food product development. *Trends in Food Science & Technology*. 2019; 91: 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.036>
9. Mezenova O.Ya. Modern food biotechnology: main problems and challenges. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023; (1): 35–46 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2023-22-1-35-46>
10. Lesnikova N.A., Kokoreva L.A., Pishchikov G.B., Protasova L.G. Prospects for the use of non-traditional vegetable raw materials for the creation of new food products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2019; 81(4): 89–97 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-89-97>
11. Gordeyev K.S., Ermolaeva E.L., Zhidkov A.A., Ilyushina E.S., Fedoseeva L.A. Biologically active food additives. *Modern scientific researches and innovations*. 2018; (9): 13 (in Russian). <https://elibrary.ru/yakwrf>
12. Grishin D.V. et al. Bioactive proteins and peptides: current state and new trends of practical application in the food industry and feed production. *Problems of Nutrition*. 2017; 86(3): 19–31 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2017-00041>
13. Donnik I.M., Kuzmin S.V., Mayzel S.G., Simonenko S.V., Semenova E.S., Simonenko E.S. An integrated approach to the implementation of a full innovative production cycle domestic adapted mixtures and clinical nutrition. *Food processing industry*. 2022; (11): 16–18 (in Russian). <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.003>
14. Kochetkova A.A., Vorobyeva V.M., Sarkisyan V.A., Vorobyeva I.S., Smirnova E.A., Shatnyuk L.N. Dynamics of innovations in food technologies: from specialization to personalization. *Problems of Nutrition*. 2020; 89(4): 233–243 (in Russian). <https://elibrary.ru/sspayq>
15. Tutelyan V.A. (ed.). Genetically modified food sources: safety assessment and control. Moscow: *Russian Academy of Medical Sciences*. 2007; 442 (in Russian). ISBN 978-5-7901-0092-5 <https://elibrary.ru/tmfssl>
16. Tyshko N.V., Sadykova E.O., Shestakova S.I., Aksyuk I.N. Novel food sources: from GMO to the broadening of Russia's bioresource base. *Problems of Nutrition*. 2020; 89(4): 100–109 (in Russian). <https://elibrary.ru/xrzqnr>
17. Meskhi B.Ch., Mozgovoy A.V., Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Sahakyan S.R., Maltseva T.A. Review and analysis of new food types. *Innovative Technologies in Science and Education ("ITSE-2022" Conference). Collection of scientific papers of the 10th Anniversary International Scientific and Practical Conference using remote technologies*. Rostov-on-Don. 2022; 97–102 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/itse.2022.97-102>
18. Lipatov N.N. Prerequisites for computer-aided design of products and diets with specified nutritional value. *Storage and Processing of Farm Products*. 1995; (3): 4–9 (in Russian).
19. Lipatov N.N., Rogov I.A. Methodology for designing food products with the required set of nutritional value indicators. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*. 1987; (2): 9–15 (in Russian).

20. Savinkov S.V., Danko T.P., Petrenko E.S., Garnova V.Yu., Meshkov V.R., Petushkova E.V. Theory and practice of food combinatory. Case: food ratios, adequate optimum nutrition. *Innovation & Investment*. 2019; (5): 339–346 (in Russian). <https://elibrary.ru/cakruz>
21. Yang J., Lee J. Application of Sensory Descriptive Analysis and Consumer Studies to Investigate Traditional and Authentic Foods: A Review. *Foods*. 2019; 8(2): 54. <https://doi.org/10.3390/foods8020054>
22. Starowicz M. Analysis of Volatiles in Food Products. *Separations*. 2021; 8(9): 157. <https://doi.org/10.3390/separations8090157>
23. Zakaria S.R., Saim N., Osman R., Abdul Haiyee Z., Juahir H. Combination of Sensory, Chromatographic, and Chemometrics Analysis of Volatile Organic Compounds for the Discrimination of Authentic and Unauthentic Harumanis Mangoes. *Molecules*. 2018; 23(9): 2365. <https://doi.org/10.3390/molecules23092365>
24. Santoso I. et al. Application of QFD in sustainable new product development in the agro-industrial sector: a systematic literature review. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2024; 17(1): 926–944. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2417016>
25. Wang T.-Y., Hsiao H.-I., Sung W.-C. Quality function deployment modified for the food industry: An example of a granola bar. *Food Science & Nutrition*. 2019; 7(5): 1746–1753. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1014>
26. Benner M. The Chain Information Model: A Systematic Approach for Food Product Development. Ph.D. Thesis. *Wageningen University*. 2005; 135. ISBN: 90-8504-223-22005
27. Stüve D., van der Meer R., Lütke Entrup M., Ali Agha M.S. Supply Chain Planning in the food industry. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. Berlin: epubli. 2020; 29: 317–353. <https://doi.org/10.15480/882.3135>
28. Никитина М.А., Крылова В.Б., Захаров А.Н., Новикова О.Н. Многофакторное планирование экспериментов при разработке новых мясных продуктов. *Всё о мясе*. 2017; (4): 54–58. <https://elibrary.ru/zdqjix>
29. Осокина А.С., Гушчин А.В., Аникина Э.А. Применение планирования эксперимента при разработке питательной среды в производственном цикле культивирования личинок *G. Mellonella* L. *Аграрная наука*. 2022; (4): 104–108. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-358-4-104-108>
30. Wicaksono A., Hendrix T., Nurhikmat A. Cost-benefit analysis on transforming conventional food businesses into canning businesses during Covid-19 pandemic. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2583: 110018. <https://doi.org/10.1063/5.0115820>
31. Янковская В.С., Дунченко Н.И., Михайлова К.В. Разработка структурированных молочных продуктов с учетом данных о рекламациях и методологии квалиметрии рисков. *Техника и технология пищевых производств*. 2022; 52(1): 2–12. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-2-12>
32. Корпачева С.М., Рогова О.В., Антипин С.Д. Квалиметрическое прогнозирование качества мучных блюд с использованием растительных заменителей молока. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2024; 86(3): 59–66. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-3-59-66>
33. Бычкова Е.С., Рождественская Л.Н. Применение квалиметрического подхода к разработке салатов. *Пищевая промышленность*. 2012; (12): 44–46. <https://elibrary.ru/pmfwjv>
34. Никитина М.А., Чернуха И.М. Применение метода анализа иерархий при оценке качества продуктов питания. *Всё о мясе*. 2019; (5): 38–40. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2019-5-38-40>
35. Лишентсева А.Н., Мельникова Л.А., Тамашевич С.Е., Селиванова М.С., Мельник Ю.А. Использование QFD-методологии при разработке обогащенного зефира. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2019; 12(1): 28–41. <https://elibrary.ru/zdguak>
36. Granato D., Calado V.M.d.A. The use and importance of design of experiments (DOE) in process modelling in food science and technology. Granato D., Ares G. (eds.). *Mathematical and Statistical Methods in Food Science and Technology*. Wiley. 2013; 1–18. <https://doi.org/10.1002/9781118434635.ch1>
37. Oganesyants L.A., Semipyatniy V.K., Galstyan A.G., Vafin R.R., Khurshudyan S.A., Ryabova A.E. Multi-criteria food products identification by fuzzy logic methods. *Foods and Raw Materials*. 2020; 8(1): 12–19. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-12-19>
20. Savinkov S.V., Danko T.P., Petrenko E.S., Garnova V.Yu., Meshkov V.R., Petushkova E.V. Theory and practice of food combinatory. Case: food ratios, adequate optimum nutrition. *Innovation & Investment*. 2019; (5): 339–346 (in Russian). <https://elibrary.ru/cakruz>
21. Yang J., Lee J. Application of Sensory Descriptive Analysis and Consumer Studies to Investigate Traditional and Authentic Foods: A Review. *Foods*. 2019; 8(2): 54. <https://doi.org/10.3390/foods8020054>
22. Starowicz M. Analysis of Volatiles in Food Products. *Separations*. 2021; 8(9): 157. <https://doi.org/10.3390/separations8090157>
23. Zakaria S.R., Saim N., Osman R., Abdul Haiyee Z., Juahir H. Combination of Sensory, Chromatographic, and Chemometrics Analysis of Volatile Organic Compounds for the Discrimination of Authentic and Unauthentic Harumanis Mangoes. *Molecules*. 2018; 23(9): 2365. <https://doi.org/10.3390/molecules23092365>
24. Santoso I. et al. Application of QFD in sustainable new product development in the agro-industrial sector: a systematic literature review. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2024; 17(1): 926–944. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2417016>
25. Wang T.-Y., Hsiao H.-I., Sung W.-C. Quality function deployment modified for the food industry: An example of a granola bar. *Food Science & Nutrition*. 2019; 7(5): 1746–1753. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1014>
26. Benner M. The Chain Information Model: A Systematic Approach for Food Product Development. Ph.D. Thesis. *Wageningen University*. 2005; 135. ISBN: 90-8504-223-22005
27. Stüve D., van der Meer R., Lütke Entrup M., Ali Agha M.S. Supply Chain Planning in the food industry. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. Berlin: epubli. 2020; 29: 317–353. <https://doi.org/10.15480/882.3135>
28. Nikitina M.A., Krylova V.B., Zakharov A.N., Novikova O.N. Multifactorial planning of experiments in the development of new meat products. *Vsyo o myase*. 2017; (4): 54–58 (in Russian). <https://elibrary.ru/zdqjix>
29. Osokina A.S., Gushchin V.A., Anikina E.A. Application of experiment planning in the development of a nutrient medium in the production cycle of cultivation of *G. Mellonella* L. Larvae. *Agrarian science*. 2022; (4): 104–108 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-358-4-104-108>
30. Wicaksono A., Hendrix T., Nurhikmat A. Cost-benefit analysis on transforming conventional food businesses into canning businesses during Covid-19 pandemic. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2583: 110018. <https://doi.org/10.1063/5.0115820>
31. Yankovskaya V.S., Dunchenko N.I., Mikhaylova K.V. New Structured Dairy Products Based on Quality Complaints and Risk Qualimetry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022; 52(1): 2–12 (in Russian). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-2-12>
32. Korpacheva S.M., Rogova O.V., Antipin S.D. Improving the quality of flour dishes using vegetable milk analogues based on the development of a qualimetric model. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2024; 86(3): 59–66 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-3-59-66>
33. Bychkova E.S., Rozhdestvenskaya L.N. Application qualimetric approach to salads. *Food processing industry*. 2012; (12): 44–46 (in Russian). <https://elibrary.ru/pmfwjv>
34. Nikitina M.A., Chernukha I.M. Using the method of hierarchy analysis in assessment of food quality. *Vsyo o myase*. 2019; (5): 38–40 (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2019-5-38-40>
35. Lilishentseva A.N., Melnikova L.A., Tamashevich S.E., Selivanova M.S., Melnik Yu.A. Using QFD methodology in the development of enriched zephyr. *Food Industry: Science and Technology*. 2019; 12(1): 28–41 (in Russian). <https://elibrary.ru/zdguak>
36. Granato D., Calado V.M.d.A. The use and importance of design of experiments (DOE) in process modelling in food science and technology. Granato D., Ares G. (eds.). *Mathematical and Statistical Methods in Food Science and Technology*. Wiley. 2013; 1–18. <https://doi.org/10.1002/9781118434635.ch1>
37. Oganesyants L.A., Semipyatniy V.K., Galstyan A.G., Vafin R.R., Khurshudyan S.A., Ryabova A.E. Multi-criteria food products identification by fuzzy logic methods. *Foods and Raw Materials*. 2020; 8(1): 12–19. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-12-19>

38. Хуршудян С.А., Рябова А.Е. Качество продукции: проблема обобщенной модели. *Контроль качества продукции*. 2021; (5): 50–53.
<https://doi.org/10.35400/2541-9900-2021-5-50-53>
39. Семипятный В.К. Идентификация пищевых продуктов. Цифровые метаинформационные решения. М.: ВНИИМ. 2021; IX: 123.
ISBN 978-5-6043854-8-7
<https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-8-7>
40. Никитина М.А., Чернуха И.М., Артамонова М.П., Кусай А.Т. Прогнозирование состава функционального пищевого продукта с использованием компьютерной симуляции. *Пищевые системы*. 2024; 7(4): 543–550.
<https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-543-550>
41. Коноваленко Л.Ю., Мишуров Н.П., Голубев И.Г., Никитина М.А., Бредихин С.А. Цифровая трансформация пищевой и перерабатывающей промышленности. Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2020; 76. ISBN 978-5-7367-1573-2
<https://elibrary.ru/mrslgz>
42. Никитина М.А., Чернуха И.М., Кусай А.Т. Мониторинг жизненного цикла пищевого продукта, созданного на основе цифрового двойника. *Всё о мясе*. 2022; (4): 22–26.
<https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-4-22-26>
43. Purlis E. Digital Twin Methodology in Food Processing: Basic Concepts and Applications. *Current Nutrition Reports*. 2024; 13(4): 914–920.
<https://doi.org/10.1007/s13668-024-00584-2>
44. İcyer N.C., Topalcengiz Z. Experimental Design and Programming Solutions for Food Engineering. Akbaş A., Buyrukoğlu S., Gökçe A. (eds.). *Programming Solutions For Engineering Problems. Nobel Akademik Yayıncılık*. 2021; 167–184.
45. Abdurrahman E.E.M., Ferrari G. Digital Twin applications in the food industry: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025; 9: 1538375.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1538375>
46. Lim C.G.Y. *et al.* Making novel staple foods the norm: perspectives from adult consumers with and without diabetes. *Appetite*. 2021; 162: 105189.
<https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105189>
47. Yusri H. *et al.* Acceptance and feasibility of novel staple foods among individuals with type 2 diabetes in Singapore: a mixed methods study. *Frontiers in Nutrition*. 2025; 12: 1594890.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1594890>
48. de Valença A.W., Bake A., Brouwer I.D., Giller K.E. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*. 2017; 12: 8–14.
<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>
49. Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Рисник Д.В., Никитюк Д.Б., Тутельян В.А. Обеспеченность населения России микронутриентами и возможность ее коррекции. Состояние проблемы. *Вопросы питания*. 2017; 86(4): 113–124.
<https://elibrary.ru/zftklk>
50. Майорникова Л.А., Кокшаров А.А., Крапива Т.В., Новоселов С.В. Обогащение пищевых продуктов как фактор профилактики микронутриентной недостаточности. *Техника и технология пищевых производств*. 2020; 50(1): 124–139.
<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-124-139>
51. Тутельян В.А., Никитюк Д.Б. Ключевые проблемы в структуре потребления пищевой продукции и прорывные технологии оптимизации питания для здоровьесбережения населения России. *Вопросы питания*. 2024; 93(1): 6–21.
<https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-1-6-21>
52. Тутельян В.А., Никитюк Д.Б., Тармаева И.Ю., Погожева А.В. Стратегия научного обеспечения реализации государственной политики в области оптимизации питания населения. *Российский вестник гигиены*. 2025; (1): 47–52.
<https://elibrary.ru/nkxhgd>
53. Schneider K.R. *et al.* The state of food systems worldwide in the countdown to 2030. *Nature Food*. 2023; 4(12): 1090–1110.
<https://doi.org/10.1038/s43016-023-00885-9>
54. Schneider K.R. *et al.* Governance and resilience as entry points for transforming food systems in the countdown to 2030. *Nature Food*. 2025; 6(1): 105–116.
<https://doi.org/10.1038/s43016-024-01109-4>
55. Wood A. *et al.* Reframing the local-global food systems debate through a resilience lens. *Nature Food*. 2023; 4(1): 22–29.
<https://doi.org/10.1038/s43016-022-00662-0>
56. Atambayeva Z. *et al.* A Risk and Hazard Analysis Model for the Production Process of a New Meat Product Blended With Germinated Green Buckwheat and Food Safety Awareness. *Frontiers in Nutrition*. 2022; (9): 902760.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.902760>
38. Khurshudyan S.A., Ryabova A.E. Product quality: the problem of a generalized model. *Product quality control*. 2021; (5): 50–53 (in Russian).
<https://doi.org/10.35400/2541-9900-2021-5-50-53>
39. Semipyatny V.K. Identification of food products. Digital meta-information solutions. Moscow: All-Russian Dairy Research Institute. 2021; IX: 123 (in Russian).
ISBN 978-5-6043854-8-7
<https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-8-7>
40. Nikitina M.A., Chernukha I.M., Artamonova M.P., Qusay A.T. Predicting composition of a functional food product using computer simulation. *Food Systems*. 2024; 7(4): 543–550 (in Russian).
<https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-543-550>
41. Konovalenko L.Yu., Mishurov N.P., Golubev I.G., Nikitina M.A., Bredikhin S.A. Digital transformation of the food and processing industry. Analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2020; 76 (in Russian). ISBN 978-5-7367-1573-2
<https://elibrary.ru/mrslgz>
42. Nikitina M.A., Chernukha I.M., Qusay A.T. Monitoring the life cycle of a food product created on the basis of the digital twin. *Vsyo o myase*. 2022; (4): 22–26 (in Russian).
<https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-4-22-26>
43. Purlis E. Digital Twin Methodology in Food Processing: Basic Concepts and Applications. *Current Nutrition Reports*. 2024; 13(4): 914–920.
<https://doi.org/10.1007/s13668-024-00584-2>
44. İcyer N.C., Topalcengiz Z. Experimental Design and Programming Solutions for Food Engineering. Akbaş A., Buyrukoğlu S., Gökçe A. (eds.). *Programming Solutions For Engineering Problems. Nobel Akademik Yayıncılık*. 2021; 167–184.
45. Abdurrahman E.E.M., Ferrari G. Digital Twin applications in the food industry: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025; 9: 1538375.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1538375>
46. Lim C.G.Y. *et al.* Making novel staple foods the norm: perspectives from adult consumers with and without diabetes. *Appetite*. 2021; 162: 105189.
<https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105189>
47. Yusri H. *et al.* Acceptance and feasibility of novel staple foods among individuals with type 2 diabetes in Singapore: a mixed methods study. *Frontiers in Nutrition*. 2025; 12: 1594890.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1594890>
48. de Valença A.W., Bake A., Brouwer I.D., Giller K.E. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*. 2017; 12: 8–14.
<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>
49. Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Risnik D.V., Nikityuk D.B., Tutelyan V.A. Micronutrient status of population of the Russian Federation and possibility of its correction. State of the problem. *Problems of Nutrition*. 2017; 86(4): 113–124 (in Russian).
<https://elibrary.ru/zftklk>
50. Mayurnikova L.A., Koksharov A.A., Krapiva T.V., Novoselov S.V. Food Fortification as a Preventive Factor of Micronutrient Deficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020; 50(1): 124–139 (in Russian).
<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-124-139>
51. Tutelyan V.A., Nikityuk D.B. Key challenges in the dietary intake structure and cutting edge technologies for optimizing nutrition to protect the health of the Russian population. *Problems of Nutrition*. 2024; 93(1): 6–21 (in Russian).
<https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-1-6-21>
52. Tutelyan V.A., Nikityuk D.B., Tarmaeva I.Yu., Pogozheva A.V. The strategy for scientific support in implementing state policy on optimizing population nutrition. *Russian bulletin of hygiene*. 2025; (1): 47–52 (in Russian).
<https://elibrary.ru/nkxhgd>
53. Schneider K.R. *et al.* The state of food systems worldwide in the countdown to 2030. *Nature Food*. 2023; 4(12): 1090–1110.
<https://doi.org/10.1038/s43016-023-00885-9>
54. Schneider K.R. *et al.* Governance and resilience as entry points for transforming food systems in the countdown to 2030. *Nature Food*. 2025; 6(1): 105–116.
<https://doi.org/10.1038/s43016-024-01109-4>
55. Wood A. *et al.* Reframing the local-global food systems debate through a resilience lens. *Nature Food*. 2023; 4(1): 22–29.
<https://doi.org/10.1038/s43016-022-00662-0>
56. Atambayeva Z. *et al.* A Risk and Hazard Analysis Model for the Production Process of a New Meat Product Blended With Germinated Green Buckwheat and Food Safety Awareness. *Frontiers in Nutrition*. 2022; (9): 902760.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.902760>

57. Sarkar T. *et al.* The Fuzzy Cognitive Map-Based Shelf-life Modelling for Food Storage. *Food Analytical Methods*. 2022; (15): 579–597.
<https://doi.org/10.1007/s12161-021-02147-5>
58. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M. Analysis of modern approaches to the processing of poultry waste and by-products: prospects for use in industrial sectors. *Ciencia e tecnologia de alimentos*. 2022; (42): e03222.
<https://doi.org/10.1590/fst.03222>
59. Sarkar T. *et al.* Application of bio-inspired optimization algorithms in food processing. *Current Research in Food Science*. 2022; 16(5): 432–450.
<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.02.006>
60. Spanova A. *et al.* Hazard analysis and critical control point (HACCP) application to the production of a new low-fat meat patty. *Cogent Food and Agriculture*. 2025; 11(1): 2546081.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2546081>
61. Зинина О.В., Вишнякова Е.А., Науменко Н.В., Ребезов М.Б. Оптимизация процесса экстракции биоактивных веществ из вишневого жмыха. *Пищевые системы*. 2025; 8(3): 335–342.
<https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-335-342>
62. Зинина О.В., Неверова О.П., Ли Я., Чжан Ф., Ребезов М.Б. Исследование влияния белковой композиции на качественные показатели хлеба. *Аграрный вестник Урала*. 2025; 25(03): 434–448.
<https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-434-448>
63. Rebezov M. *et al.* Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024; (18): 523–546.
<https://doi.org/10.5219/1972>
64. Meinert C. *et al.* Food safety and food security through predictive microbiology tools: a short review. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2023; (17): 324–342.
<https://doi.org/10.5219/1854>
65. Rebezov M. *et al.* Ultrasound-assisted innovations in protein processing: review. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024; (18): 570–587.
<https://doi.org/10.5219/1978>
66. Rebezov M. *et al.* Application of Electrolyzed Water in the Food Industry: A Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(13): 6639.
<https://doi.org/10.3390/app12136639>
67. Chaari M. *et al.* Novel Active Food Packaging Films Based on Gelatin-Sodium Alginate Containing Beetroot Peel Extract. *Antioxidants*. 2022; 11(11): 2095.
<https://doi.org/10.3390/antiox11112095>
68. Smaoui S. *et al.* Zinc oxide nanoparticles in meat packaging: A systemic review of recent literature. *Food Packaging and Shelf Life*. 2023; (36): 101045.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101045>
69. Зинина О.В., Меренкова С.П., Ребезов М.Б., Вишнякова Е.А. Исследование свойств белковых гидролизатов, полученных из желудков цыплят-бройлеров, как потенциального компонента биоактивных пленочных покрытий. *Пищевые системы*. 2024; 7(1): 44–51.
<https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-44-51>
70. Наумова Н.Л., Ребезов М.Б., Варганова Е.Я. Функциональные продукты. Спрос и предложение. Челябинск: Издательский центр Южно-Уральского государственного университета. 2012; 78.
<https://elibrary.ru/rafkcp>
71. Ребезов М.Б., Наумова Н.Л., Хайруллин М.Ф., Альхамова Г.К., Лукин А.А. Изучение отношения потребителей к обогащенным продуктам питания. *Пищевая промышленность*. 2011; (5): 13–15.
<https://elibrary.ru/nydzgn>

ОБ АВТОРАХ

Лада Николаевна Рождественская

кандидат экономических наук, доцент, докторант
lada2006job@mail.ru

Уральский государственный экономический университет,
ул. 8 Марта / Народной воли, 62/45, Екатеринбург, 620144,
Россия

57. Sarkar T. *et al.* The Fuzzy Cognitive Map-Based Shelf-life Modelling for Food Storage. *Food Analytical Methods*. 2022; (15): 579–597.
<https://doi.org/10.1007/s12161-021-02147-5>

58. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M. Analysis of modern approaches to the processing of poultry waste and by-products: prospects for use in industrial sectors. *Ciencia e tecnologia de alimentos*. 2022; (42): e03222.
<https://doi.org/10.1590/fst.03222>

59. Sarkar T. *et al.* Application of bio-inspired optimization algorithms in food processing. *Current Research in Food Science*. 2022; 16(5): 432–450.
<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.02.006>

60. Spanova A. *et al.* Hazard analysis and critical control point (HACCP) application to the production of a new low-fat meat patty. *Cogent Food and Agriculture*. 2025; 11(1): 2546081.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2546081>

61. Zinina O.V., Vishnyakova E.A., Naumenko N.V., Rebezov M.B. Optimization of the extraction process of bioactive substances from cherry pomace. *Food Systems*. 2025; 8(3): 335–342 (in Russian).
<https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-335-342>

62. Zinina O.V., Neverova O.P., Li Ya., Zhang F., Rebezov M.B. Research the effect of protein composition on qualitative indicators of bread. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25(03): 434–448 (in Russian).
<https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-434-448>

63. Rebezov M. *et al.* Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024; (18): 523–546.
<https://doi.org/10.5219/1972>

64. Meinert C. *et al.* Food safety and food security through predictive microbiology tools: a short review. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2023; (17): 324–342.
<https://doi.org/10.5219/1854>

65. Rebezov M. *et al.* Ultrasound-assisted innovations in protein processing: review. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024; (18): 570–587.
<https://doi.org/10.5219/1978>

66. Rebezov M. *et al.* Application of Electrolyzed Water in the Food Industry: A Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(13): 6639.
<https://doi.org/10.3390/app12136639>

67. Chaari M. *et al.* Novel Active Food Packaging Films Based on Gelatin-Sodium Alginate Containing Beetroot Peel Extract. *Antioxidants*. 2022; 11(11): 2095.
<https://doi.org/10.3390/antiox11112095>

68. Smaoui S. *et al.* Zinc oxide nanoparticles in meat packaging: A systemic review of recent literature. *Food Packaging and Shelf Life*. 2023; (36): 101045.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101045>

69. Zinina O.V., Merenkova S.P., Rebezov M.B., Vishnyakova E.A. Research of the properties of protein hydrolysates obtained from the broiler chicken gizzards as a potential component of bioactive film coatings. *Food systems*. 2024; 7(1): 44–51 (in Russian).
<https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-44-51>

70. Naumova N.L., Rebezov M.B., Varganova E.Ya. Functional Products. Supply and Demand. Chelyabinsk: Publishing Center of South Ural State University. 2012; 78 (in Russian).
<https://elibrary.ru/rafkcp>

71. Rebezov M.B., Naumova N.L., Khairullin M.F., Alkhamova G.K., Lukin A.A. Study of consumer attitudes toward fortified food products. *Food processing industry*. 2011; (5): 13–15 (in Russian).
<https://elibrary.ru/nydzgn>

ABOUT THE AUTHORS

Lada Nikolaevna Rozhdestvenskaya

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Doctoral Student
lada2006job@mail.ru

Ural State University of Economics,
62/45 8th March Str. / Narodnoy Voli Str., Yekaterinburg,
620144, Russia

УДК 338.436.33

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-198-208

Е.С. Тищенко¹Ю.А. Клейменова¹ ✉Е.С. Кравченко²¹Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия²Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, Донецк, Россия

✉ 20ulya1987@mail.ru

Поступила в редакцию: 14.07.2025

Одобрена после рецензирования: 13.10.2025

Принята к публикации: 28.10.2025

© Тищенко Е.С., Клейменова Ю.А., Кравченко Е.С.

Комплексный анализ использования ресурсного потенциала агропромышленного предприятия на основе цифровых инструментов бизнес-анализа

РЕЗЮМЕ

Бизнес-анализ использования ресурсов предприятия является крайне актуальным, поскольку применение его инструментария позволяет предприятиям повышать свою конкурентоспособность, прибыльность и устойчивость в условиях постоянно меняющейся экономической и технологической среды. Без грамотного анализа и управления ресурсами предприятие рискует потерять свою долю рынка и столкнуться с серьезными финансовыми трудностями. Использование классических инструментов и методов бизнес-анализа на крупных предприятиях представляется трудоемким процессом из-за большого массива анализируемых данных. В условиях цифровизации экономики хозяйствующим субъектам доступны новые возможности, которые способны существенно снизить риски наличия ошибок при расчетах, обусловленные человеческим фактором. В статье обоснованы преимущества использования цифровых инструментов бизнес-анализа для оценки эффективности ресурсного потенциала агропромышленного предприятия и определения основных направлений его оптимизации. Анализируются данные о состоянии ресурсов агропромышленного предприятия и потенциал их эффективного использования. Авторы установили, что использование цифровых инструментов бизнес-анализа — необходимый тренд, который позволяет хозяйствующим субъектам автоматизировать свою работу, повышая ее качество и эффективность. Предложен научно-практический подход к комбинированному использованию цифровых инструментов бизнес-анализа, который формирует полный цикл обработки данных о всех видах ресурсов, используемых на предприятии.

Ключевые слова: бизнес-анализ, агропромышленный комплекс, ресурсы предприятия, цифровизация, инструменты, эффективность

Для цитирования: Тищенко Е.С., Клейменова Ю.А., Кравченко Е.С. Комплексный анализ использования ресурсного потенциала агропромышленного предприятия на основе цифровых инструментов бизнес-анализа. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 198–208. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-198-208>

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-198-208

Evgenia S. Tishchenko¹Julia A. Kleimenova¹ ✉Elena S. Kravchenko²¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia²Donetsk National University of Economics and Trade Named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, Russia

✉ 20ulya1987@mail.ru

Received by the editorial office: 14.07.2025

Accepted in revised: 13.10.2025

Accepted for publication: 28.10.2025

© Tishchenko E.S., Kleimenova Yu.A., Kravchenko E.S.

Comprehensive analysis of the use of the resource potential of an agro-industrial enterprise based on digital business analysis tools

ABSTRACT

Business analysis of the use of enterprise resources is extremely relevant, since the use of its tools allows enterprises to increase their competitiveness, profitability and sustainability in the context of a constantly changing economic and technological environment. Without proper analysis and resource management, an enterprise risks losing its market share and facing serious financial difficulties. Using classic business analysis tools and methods at large enterprises seems to be a labor-intensive process due to the large array of data being analyzed. In the context of digitalization of the economy, economic entities have access to new opportunities that can significantly reduce the risks of errors in calculations due to the human factor. The article substantiates the advantages of using digital business analysis tools to increase the resource potential of an agro-industrial enterprise. Data on the state of resources of an agro-industrial enterprise and the potential for their effective use are analyzed. The authors found that the use of digital business analysis tools is a necessary trend that allows business entities to automate their work, improving its quality and efficiency. The conducted analysis allowed us to identify specific digital business analysis tools, the use of which will improve the efficiency of using the resources of an agro-industrial enterprise.

Key words: business-analysis, agro-industrial complex, enterprise resources, digitalization, tools, efficiency

For citation: Tishchenko E.S., Kleimenova J.A., Kravchenko E.S. Comprehensive analysis of the use of the resource potential of an agro-industrial enterprise based on digital business analysis tools. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 198–208 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-198-208>

Введение/Introduction

Агропромышленный комплекс не только важен для населения страны, но и является приоритетным для государства, так как от его состояния и развития зависят продовольственная безопасность, социально-экономическое положение и экономическая безопасность в целом [1–4].

В условиях глобализации и усиливающейся конкуренции многие предприятия, в том числе и агропромышленного комплекса, вынуждены постоянно искать пути повышения эффективности своей деятельности, чтобы оставаться конкурентоспособными [5–9].

Оптимальное использование ресурсов — один из ключевых факторов успеха.

По мнению М.В. Молоховича, ресурсный потенциал выступает основой успешного функционирования любого предприятия, тем базисом, на котором строится вся его деятельность, обеспечиваются непрерывность и высокая эффективность всех хозяйственных процессов. Дефицит тех или иных ресурсов, их низкое качество или неэффективное использование в конечном итоге могут привести к снижению результативности деятельности компании, значительному ухудшению ее финансового состояния и утрате рыночных позиций [10].

Применение инновационных управленческих технологий в практике деятельности различных хозяйствующих субъектов [10] предоставляет возможности для автоматизации процессов, улучшения управления ресурсами и повышения эффективности их использования. По мнению многих авторов, способы и технологии, которые еще совсем недавно были высокоэффективными, в условиях цифровой трансформации экономики постепенно утрачивают свою значимость и начинают уступать место инновационным аналогам [11–13]. В сложившихся экономических условиях они уже не могут обеспечивать необходимую результативность, хотя и продолжают активно использоваться в практике деятельности отечественных субъектов хозяйствования. В связи с этим возникает потребность выработки новых подходов к управлению ресурсным потенциалом компании, опирающихся на современный инструментарий управленческой деятельности и соответствующих требованиям времени.

Бизнес-анализ помогает оценить эффективность внедрения новых технологий и выбрать оптимальные решения. В.В. Леушкина отмечает, что внедрение инновационных технологий при цифровизации бизнеса способствует созданию IT-решений, практическое использование которых позволяет достигнуть повышения эффективности использования ресурсов. Инновационные технологии становятся обыденной практикой для управления, доказывая свою значимость и полезность в решении важных задач. Происходит повышение платежеспособности организаций, обеспечивается своевременное определение рисков

и принятия управленческих решений по их устранению [14].

Л.И. Зинина и А.А. Прокофьева считают, что, несмотря на объективные условия в развитии инструментов бизнес-аналитики, необходимо создание инновационной модели развития IT-сферы на основе информационно-технологических решений в соответствии с современными требованиями цифровой экономики [15]. Развитие новых цифровых инструментов бизнес-анализа обеспечивает более точную информацию для принятия управленческих решений, что способствует повышению качества управления и эффективности деятельности предприятия в целом.

Цель данного исследования — внедрение цифровых технологий и бизнес-аналитики для повышения эффективности использования ресурсного потенциала агропромышленного предприятия в условиях высокой конкуренции и цифровизации экономики на основе комплексного анализа состояния использования ресурсов, а также опыта внедрения цифровых инструментов с целью повышения конкурентоспособности предприятия.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд основных задач: провести общий анализ эффективности использования ресурсного потенциала предприятия агропромышленного комплекса; провести факторный анализ ключевых показателей эффективности использования ресурсов; обосновать преимущества использования цифровых инструментов бизнес-анализа; предложить этапы внедрения цифровых инструментов бизнес-анализа для управления ресурсным потенциалом предприятия агропромышленного комплекса.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для достижения цели исследования использовали общенаучные методы исследования — аналитический, графический, табличный; расчет относительных показателей.

В исследовании разработаны направления повышения использования ресурсного потенциала на основе оптимизации инструментов бизнес-анализа на примере предприятия агропромышленного комплекса Краснодарского края АО ОПХ «Центральное» за 2021–2023 гг., которое входит в состав Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства (СКЗНИИСВиВ) РФ и является основной опытно-производственной базой научного учреждения по развитию генофонда плодовых культур, селекции и сортоизучения, отработке агротехнологических и технологических регламентов производства. Специализация предприятия — растениеводство.

На первом этапе исследования был проведен общий анализ эффективности использования ресурсов агропромышленного предприятия. В частности, были проанализированы показатели

эффективности использования экономических ресурсов.

Второй этап предполагает проведение факторного анализа ключевых показателей эффективности использования ресурсов: фондоотдачи, производительности труда и рентабельности продаж. Для проведения факторного анализа был использован метод цепных подстановок, который позволил оценить влияние каждого фактора отдельно, определить степень его воздействия на изменение показателей фондоотдачи, производительности труда и рентабельности, установить направление влияния каждого фактора (положительное или отрицательное), а также выявить ключевые факторы роста показателей эффективности использования ресурсов и разработать обоснованные управленческие решения относительно направлений повышения эффективности использования ресурсов на предприятии.

На третьем этапе обосновываются преимущества использования современных цифровых инструментов для анализа эффективности использования ресурсного потенциала агропромышленного предприятия и проводится их сравнительная характеристика по критериям «назначение», «стоимость», «пользовательский интерфейс», «масштабируемость», «безопасность данных», «интеграция», «инструмент анализа», «дополнительные сервисы», «рекомендуемые сегменты бизнеса», анализируются практические аспекты применения пакета прикладных программ «1С:Предприятие»¹, MS Excel (США), Tableau² для управления ресурсами в практике деятельности агропромышленного предприятия. Далее обосновывается научно-практический подход к комбинированному использованию цифровых инструментов бизнес-анализа («1С:Предприятие», MS Excel (США), Tableau) и предлагается этапизация внедрения цифровых инструментов бизнес-анализа для управления ресурсным

потенциалом на предприятии. Приводится детальная характеристика каждого этапа имплементации в практику деятельности агропромышленного предприятия.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Анализ внедрения цифровых инструментов бизнес-анализа для повышения ресурсного потенциала предприятия проводили на одном из предприятий агропромышленного комплекса Краснодарского края, основная производственная деятельность которого сосредоточена на следующих направлениях: возделывание полного зонального ассортимента плодово-ягодных культур; выращивание посадочного материала плодовых и ягодных культур; переработка плодово-ягодного сырья с выпуском широкого ассортимента консервной продукции.

Основными существенными составляющими ресурсного потенциала организации являются социальный потенциал (работники), экономический потенциал (финансовые составляющие), технологический потенциал (основные средства). Каждая из вышеперечисленных групп ресурсов имеет свои показатели, которые характеризуют эффективность их использования.

В таблице 1 приведены основные показатели оценки эффективности использования ресурсов агропромышленного предприятия.

Анализируя данные таблицы 1, можно сделать вывод о том, что в анализируемом предприятии все виды ресурсов используются достаточно эффективно. Так, за исследуемый период выручка от реализации продукции выросла с 153 430 тыс. руб. в 2021 году до 184 674 тыс. руб. в 2023-м, абсолютное увеличение составило 31 244 тыс. руб., или 20,36%. Вместе с тем в сравнении с 2022 годом наблюдается ее снижение на 41 864 тыс. руб.

Таблица 1. Эффективность использования ресурсов АО ОПХ «Центральное»³

Table 1. Efficiency of resource use of JSC OPH «Central»³

Показатель	2021 г.	2022 г.	\2023 г.	Абсолютное отклонение, +/-	
				2023 г. от 2021 г.	2023г. от 2022 г.
Эффективность использования трудовых ресурсов					
Выручка, тыс. руб.	153 430,00	226 538,00	184 674,00	31 244,00	-41 864
Среднесписочная численность персонала, чел.	110	85	75	-35	-10
Производительность труда, тыс. руб. / чел.	1394,82	2665,15	2462,32	1067,50	-202,83
Эффективность использования технологических ресурсов					
Среднегодовая стоимость основных средств, тыс. руб.	268 219,00	244 772,00	225 035,00	-43 184,00	-19 737
Фондоотдача, руб.	0,57	0,93	0,82	0,25	-0,11
Эффективность использования экономических ресурсов					
Валовая прибыль (убыток), тыс. руб.	19615,00	49 113,00	50 226,00	30 611,00	1113
Рентабельность продаж, %	12,78	21,68	27,2	14,42	5,52

¹ <https://www.1c-catalog.ru/>

² <https://practicum.yandex.ru/blog/funkcii-i-vozmozhnosti-tableau/>

³ Официальный сайт АО ОПХ «Центральное»: бухгалтерская отчетность.

https://www.audit-it.ru/buh_otchet/2311003537_ao-opkh-tsentralkoe (дата обращения 23.06.2025).

Среднесписочная численность сотрудников снизилась с 110 человек в 2021 году до 75 — в 2023-м, сокращение составило 35 человек. Оптимизация численности способствовала повышению производительности труда работников за 2021–2023 гг. на 1067,50 тыс. руб., что является положительным фактором, демонстрирующим эффективность управления трудовыми ресурсами.

В отчетном периоде предприятие реализовало устаревшие активы, в результате чего стоимость основных средств сократилась на 4384 тыс. руб. Динамика фондоотдачи демонстрирует отдачу инвестиций в основные средства. Динамика фондоотдачи за 2022–2023 гг. (-0,11 пункта) свидетельствует о наметившейся тенденции снижения эффективности вложений в основной капитал.

Анализ эффективности использования экономических ресурсов показал, что валовая прибыль имела стабильную динамику роста — с 19 615 тыс. руб. в 2021 году до 50 226 тыс. руб. в 2023-м, увеличение составило 30 611 тыс. руб. Относительно 2022 года следует отметить рост данного показателя (1113 тыс. руб.), что позитивно характеризует экономическое положение агропромышленного предприятия.

Положительно следует отметить рост доли прибыли в расчете на единицу реализованной продукции, поскольку показатель рентабельности продаж имеет высокую динамику роста с 12,78% в 2021 году до 27,2% в 2023-м, абсолютный прирост составил +14,42 п. Повышение значения показателя рентабельности свидетельствует о повышении экономической устойчивости бизнеса.

Обобщая результаты проведенного анализа эффективности использования ресурсов, можно сделать ряд выводов:

- 1) агропромышленное предприятие оптимально использует трудовые ресурсы, обеспечивая рост производительности труда;
- 2) сокращение стоимости основных средств сопровождается ростом фондоотдачи, что свидетельствует о повышении технологической эффективности на предприятии;
- 3) увеличение суммы полученной валовой прибыли и, как результат, повышение рентабельности продаж обеспечивают улучшение финансово-

экономического состояния агропромышленного предприятия.

Таким образом, управление ресурсами в агропромышленном предприятии осуществляется достаточно эффективно, однако дальнейший мониторинг ресурсного потенциала на основе комплексного применения инструментов бизнес-анализа позволит своевременно выявлять потенциальные проблемы и поддерживать стабильное развитие предприятия в долгосрочной перспективе.

На эффективность использования тех или иных ресурсов оказывают влияние различные факторы. Факторный анализ является эффективным инструментом изучения причин изменения эффективности функционирования и использования ресурсов предприятия, однако это возможно только при соблюдении методики его проведения [16].

Результаты факторного анализа эффективности использования ресурсов агропромышленного предприятия представлены в таблице 2.

Анализируя данные таблицы 2, можно сделать следующие выводы: на повышение эффективности использования социального потенциала наибольшее влияние оказало снижение среднесписочной численности персонала; на повышение эффективности использования технологического потенциала наибольшее влияние оказал фактор снижения среднегодовой стоимости основных средств; на повышение эффективности использования экономических ресурсов наибольшее влияние оказал фактор повышения валовой прибыли.

Рост валовой прибыли обусловлен более быстрым ростом выручки и более медленным темпом роста себестоимости. Следовательно, на рентабельность продаж оказывает положительное влияние ценовая политика хозяйствующего субъекта.

Эффективность использования ресурсов организации достигается за счет факторов внутренней среды. Однако деятельность хозяйствующего субъекта неразрывно связана с негативным и позитивным воздействием иных внутренних и внешних факторов среды юридического лица. Как отмечают некоторые авторы, жизнеспособным и

Таблица 2. Факторный анализ показателей эффективности использования ресурсов АО ОПХ «Центральное»⁴

Table 2. Factor analysis of resource utilization efficiency indicators of JSC OPH "Central"⁴

Показатель	2021 г.	Подстановки		2023 г.	Абсолютное отклонение, +/-
		1-я	2-я		
Среднесписочная численность персонала, чел.	110	110	75	75	-35
Производительность труда, тыс. руб. / чел.	1394,82	1678,85	2045,73	2462,32	1067,50
Среднегодовая стоимость основных средств, тыс. руб.	268 219,00	268 219,00	225 035,00	225 035,00	-43 184,00
Фондоотдача, руб.	0,57	0,69	0,68	0,82	0,25
Валовая прибыль (убыток), тыс. руб.	19 615,00	19 615,00	50 226,00	50 226,00	30 611,00
Рентабельность продаж, %	12,78	10,62	32,74	27,20	14,41

⁴ Официальный сайт АО ОПХ «Центральное»: бухгалтерская отчетность.

https://www.audit-it.ru/buh_otchet/2311003537_ao-opkh-tsentrainoe (дата обращения: 23.06.2025).

конкурентоспособным останется только то предприятие, которое сможет адаптироваться под все требования и постоянно меняющиеся факторы [17].

Оценка всех факторов — трудоемкий процесс. Особенно это касается внешних факторов.

Применение цифровых инструментов бизнес-анализа позволяет оптимизировать затраты на проведение анализа, учесть неиспользованные возможности, к которым можно отнести повышение точности и глубины расчетов, визуализация и моделирование полученных данных (рис. 1).

Как отмечает Н.Г. Баландина, невозможно выстраивать механизмы повышения эффективности работы компании без применения инновационных IT-инструментов обработки, анализа и визуализации данных. Цифровые инструменты в бизнес-аналитике помогают ускорить бизнес-процессы и сделать более точным процесс принятия управленческих решений [18].

Современные программы часто интегрируются с другими системами предприятия (ERP, CRM, SCM), что позволяет получать данные из различных источников в едином формате и проводить более комплексный анализ. Существуют различные типы инструментов бизнес-анализа, каждый из которых обладает своей функциональностью, которая позволяет выявлять тенденции и закономерности и принимать оптимальные решения [19].

Выбор конкретных инструментов зависит от специфики предприятия, его размера, отрасли и доступных ресурсов, то есть это комплексный, многоаспектный процесс, требующий синхронизации развития ключевых компонентов потенциала и учета широкого спектра влияющих факторов [20].

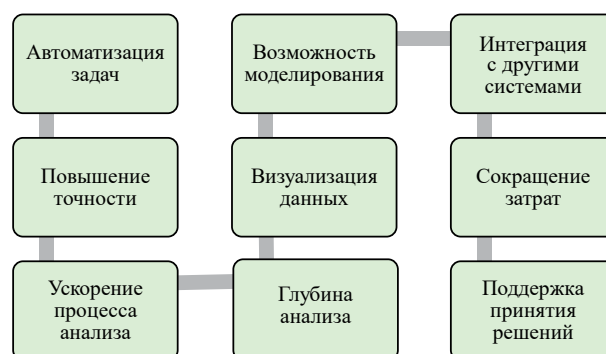
Однако можно выделить несколько ключевых направлений и примеры инструментов, которые используются в таких программах.

1. Анализ эффективности использования ресурсов. Методы: ABC-анализ (классификация ресурсов по значимости), анализ Парето (выявление ключевых факторов, влияющих на эффективность), анализ затрат и прибыли по продуктам (услугам), анализ ценности (Value Stream Mapping), анализ потоков материалов и информации; инструменты: MS Excel (для базового анализа), специализированное программное обеспечение для бизнес-аналитики (Tableau, Power BI, Qlik Sense), ERP-системы (SAP, Oracle, «1С»), специализированные программные продукты для управления запасами, производственными процессами.

2. Оптимизация бизнес-процессов. Методы: BPMN (Business Process Model and Notation) — для моделирования и анализа процессов, Six Sigma — для улучшения качества и эффективности, Lean — для минимизации потерь, Kaizen — для непрерывного улучшения; инструменты: программное обеспечение для моделирования бизнес-процессов (Bizagi, ARIS, Lucidchart),

Рис. 1. Преимущества использования цифровых инструментов (составлено авторами)

Fig. 1. Benefits of using digital tools (compiled by the authors)



программное обеспечение для управления проектами (MS Project, Jira, Asana).

3. Управление персоналом и повышение производительности труда. Методы: анализ производительности труда, оценка эффективности сотрудников, программы обучения и развития персонала, мотивационные программы; инструменты: HR-системы (для учета времени, оценки производительности, управления персоналом), системы для проведения опросов и оценки эффективности.

4. Управление финансами и инвестициями. Методы: анализ финансовой отчетности, бюджетирование, анализ инвестиционных проектов, управление денежными потоками; инструменты: бухгалтерские программы, системы финансового планирования и анализа, программное обеспечение для моделирования финансовых потоков.

5. Управление цепями поставок. Методы: анализ цепочки поставок, оптимизация логистики, управление запасами, управление рисками в цепи поставок; инструменты: WMS (Warehouse Management System), TMS (Transportation Management System), программное обеспечение для планирования ресурсов предприятия (MRP), системы управления взаимоотношениями с поставщиками (SRM).

Вместо отдельных программ часто используются комплексные подходы, которые сочетают методы и инструменты из разных областей. К таким цифровым инструментам можно отнести программы:

- по повышению операционной эффективности, которая сочетает анализ бизнес-процессов (Lean, Six Sigma), управление запасами и оптимизацию логистики, цифровизацию предприятия, которая включает внедрение новых технологий, автоматизацию процессов, использование данных для принятия решений;
- по повышению качества продукции, которая использует методы Six Sigma, контроля качества и анализа customer feedback.

В таблице 3 представлен сравнительный анализ современных цифровых инструментов,

Таблица 3. Сравнительный анализ современных цифровых инструментов, используемых для управления ресурсным потенциалом на предприятии

Table 3. Comparative analysis of modern digital tools used to manage an enterprise's resource potential

Критерий	«1С:Предприятие»	Microsoft Excel	Tableau
Назначение	Основной финансовый учет, управление ресурсами	Табличный редактор, обработка данных	Визуализация данных
Стоимость	Бесплатная версия ограниченная, платные лицензии	Бесплатная	Лицензия по подписке
Пользовательский интерфейс	Доступный	Простой	Ориентирован на визуализацию
Масштабируемость	Применим в деятельности предприятий малого и среднего бизнеса	Ограниченное расширение функциональных возможностей	Ориентирован на презентацию крупных проектов
Безопасность данных	Стандартная защита данных	Низкий уровень защищенности корпоративных данных	Хорошая защита данных
Интеграция	Интеграция с разными источниками данных, внешними сервисами	Базовая интеграция с файлами CSV и другими таблицами	Высокая интеграция с хранилищами данных
Инструмент анализа данных	Простейшие отчеты и агрегированные данные	Анализ данных и построение диаграмм	Мощные инструменты визуализации и анализа данных
Дополнительные сервисы	Электронный документооборот, BI-платформы	Макросы, внешние скрипты	Внешние приложения и библиотеки Python/R
Рекомендуемые сегменты бизнеса	Малый и средний бизнес, небольшие подразделения крупных предприятий	Предприятия среднего бизнеса, частные предприниматели	Крупные предприятия, финансовые службы, маркетинг

Примечание: составлено авторами на основе обобщения [1, 10–18].

используемых для управления ресурсным потенциалом на предприятии в настоящем эксперименте.

Отметим, что при выборе инструмента для управления ресурсным потенциалом предприятия важно учитывать его масштаб (крупное, малое или среднее), требования к защите данных, необходимость интеграции с другими системами и возможный бюджет на его приобретение и обслуживание. Значительная часть информационных решений в области управления ресурсами предлагает широкую палитру возможностей, однако наилучших результатов достигают те предприятия, которые выбирают систему, соответствующую масштабу и целям своего бизнеса.

Стоит акцентировать внимание на том, что результативность использования программы бизнес-анализа зависит не только от используемых инструментов, но и от квалификации персонала, поддержки руководства, четкого определения целей и показателей эффективности. Важность человеческого фактора и его непосредственная связь с технологиями часто не учитываются, что может стать серьезным барьером на пути внедрения и реализации новых технологий [21]. Кроме того, перед внедрением любой программы необходимо провести тщательный анализ текущего состояния предприятия и определить конкретные задачи, которые нужно решить.

Относительно использования цифровых инструментов для управления ресурсами в практике деятельности агропромышленного предприятия отметим, что на предприятии для анализа отдельных составляющих ресурсного потенциала используется MS Excel. Его применение позволяет подготавливать базу и проводить анализ динамики, структуры, эффективности, расчета относительных и абсолютных

показателей использования ресурсного потенциала предприятия.

Следует отметить и ценность цифрового инструментария программы «1С:Предприятие». С помощью данной программы на предприятии автоматизированы различные аспекты деятельности, такие как бухгалтерский учет, производство, логистика, продажи, кадровый учет. В то же время данные программы «1С:Предприятие» недостаточно полно используются в качестве информационного источника, аккумулирующего все данные о ресурсном потенциале предприятия. Кроме того, для оперативного получения представления о состоянии отдельных видов ресурсов, создания информативных графиков и диаграмм в агропромышленном предприятии используется программный пакет Tableau.

Несмотря на то что для оценки ресурсов в агропромышленном предприятии используются отдельные функции указанных выше программных пакетов, их применение является достаточно ограниченным, а программные продукты не используются совместно.

Комбинированное использование программных продуктов «1С:Предприятие», MS Excel и Tableau и полное использование их функций создадут эффект синергии и позволят агропромышленному предприятию обеспечивать оперативность и точность аналитических процедур, своевременно получать объективные данные о расходовании ресурсов в разрезе отдельных подразделений, сформировать целостную картину состояния ресурсного потенциала предприятия, будут способствовать улучшению качества планирования и контроля ресурсов на предприятии, создадут информационный базис для разработки эффективной стратегии управления ресурсами, оптимизируя затраты и увеличивая прибыль предприятия.

Исходя из данных рисунка 3, можно сделать вывод о том, что внедрение MS Excel позволит аккумулировать данные учета из программы «1С: Предприятие» и формировать промежуточные выводы по эффективности использования ресурсного потенциала как в обобщенной группе, так и по видам. Следовательно, это позволит сфокусироваться на тех элементах ресурсного потенциала агропромышленного предприятия, где выявлена неэффективность или снижение эффективности, а именно оборачиваемость оборотных средств, запасов и дебиторской задолженности.

Завершающим этапом является внедрение программного продукта Tableau (рис. 4).

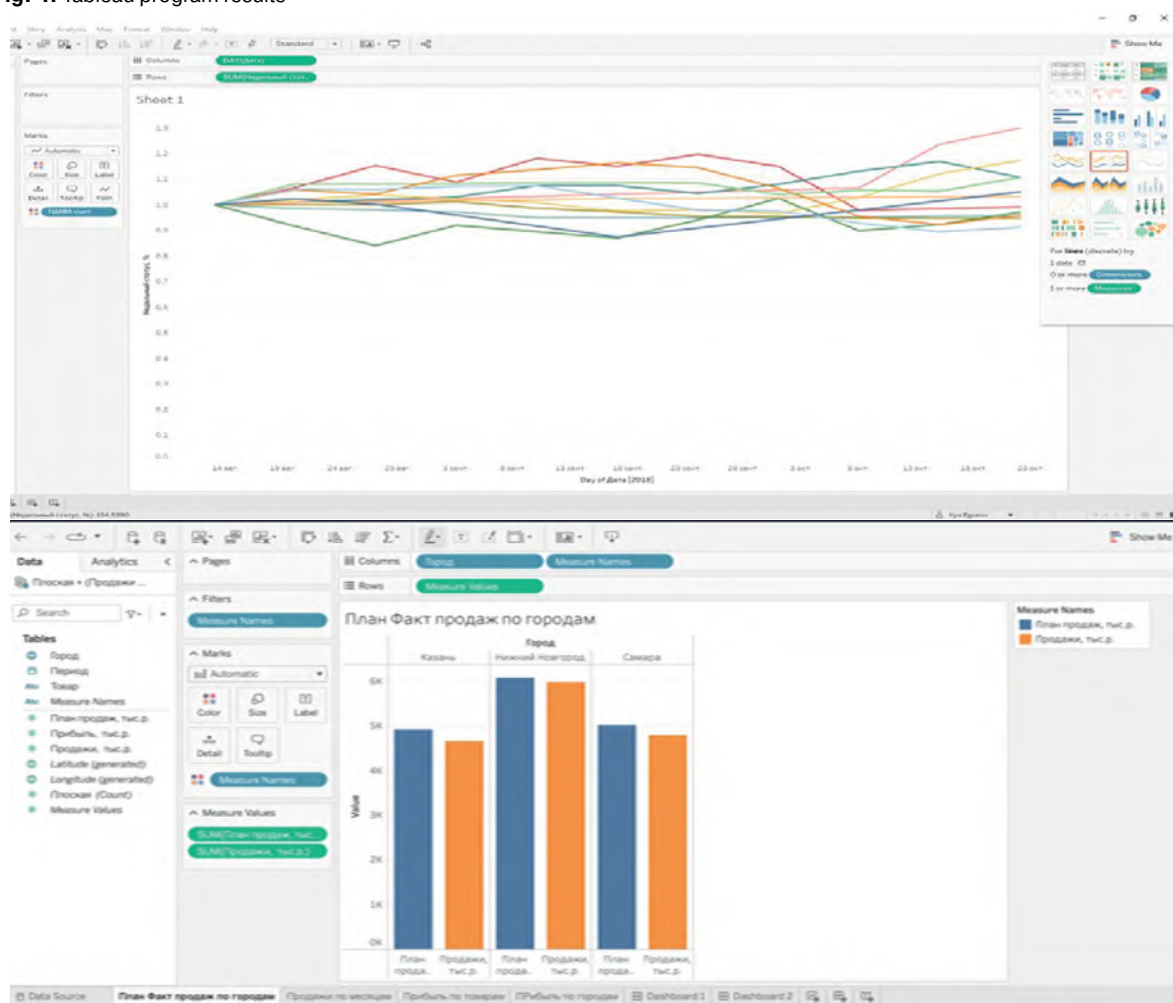
Исходя из данных рисунка 4, можно сделать вывод о том, что использование Tableau для оценки эффективности использования ресурсного потенциала предприятия дает возможность получать динамическую интерактивную визуализацию данных о состоянии и динамике ресурсов на предприятии с помощью создания дашбордов, информативных графиков и диаграмм, что обеспечивает наглядность и упрощает восприятие информации о структуре, динамике и

эффективности использования ресурсного потенциала на предприятии.

В ходе анализа установлено, что для повышения эффективности использования ресурсного потенциала агропромышленного предприятия необходимо: ускорить оборачиваемость запасов, для чего рекомендуется использовать подход Just-in-time (JIT), осуществлять контроль остатков запасов, для предотвращения накопления излишних запасов использовать современные методы прогнозирования (например, Big Data и ML), осуществлять контроль своевременности погашения дебиторской задолженности, для чего рекомендуется проводить ежедневный контроль статуса долгов и составлять отчеты о сроках ее погашения, закрепить персональную ответственность за просроченные платежи, установить жесткие ограничения по срокам предоставления отсрочек платежа, более рационально расходовать денежные средства, укрепить сотрудничество с надежными кредиторами и инвесторами, автоматизировать процессы контроля запасов, закупок, дебиторской задолженности и анализа финансов на основе внедрения CRM-систем и ERP-программ.

Рис. 4. Результаты работы программы Tableau⁶

Fig. 4. Tableau program results⁶



⁶ Официальный сайт АО ОПХ «Центральное»: бухгалтерская отчетность.
https://www.audit-it.ru/buh_otchet/2311003537_ao-opkh-tsentrainoe (дата обращения: 23.06.2025).

Соблюдение этих мер позволит эффективно контролировать дебиторскую задолженность, ускорять оборачиваемость запасов и добиться более рационального использования оборотных активов предприятия, что будет способствовать повышению уровня эффективности использования ресурсного потенциала на предприятии.

Полученные результаты представляют научный интерес и могут быть использованы для повышения эффективности ресурсного потенциала предприятий агропромышленного сектора в условиях цифровизации экономики, поскольку для нормального их функционирования необходимо адаптировать свои бизнес-процессы под существующие тенденции, иначе организации могут не выдержать конкуренции и исчезнуть с рынка [22].

Кроме того, как отмечают А.А. Иванова и О.Ю. Смыслова, автоматизация и улучшенная аналитика открывают возможности для создания новых рабочих мест в высокотехнологичных отраслях и развития цифровой инфраструктуры в сельских регионах, способствуют общей модернизации отрасли, что является важным шагом на пути к устойчивой и эффективной агроэкономике [23].

Выводы/Conclusions

Авторами был проведен анализ внедрения цифровых инструментов бизнес-анализа с целью повышения ресурсного потенциала агропромышленного предприятия.

Предложены этапизация внедрения цифровых инструментов бизнес-анализа для управления ресурсным потенциалом и научно-практический

подход к комбинированному использованию цифровых инструментов бизнес-анализа «1С:Предприятие», MS Excel, Tableau, преимуществом которого по сравнению с обособленным их использованием является возможность создания полного цикла обработки данных о всех видах ресурсов, используемых на предприятии — от ввода и накопления информации до углубленного анализа и визуализации результатов, активируя общий аналитический потенциал использования каждого из инструментов в наиболее эффективном направлении исследования ресурсного потенциала предприятия, что позволяет своевременно выявлять проблемные зоны в управлении ресурсным потенциалом и формирует информационный базис для принятия обоснованных перспективных направлений его развития и повышения эффективности использования.

Авторы предполагают, что комбинированное использование цифровых инструментов бизнес-анализа в агропромышленном предприятии позволит выявить скрытые резервы повышения эффективности даже на успешно функционирующем предприятии. Активное внедрение цифровых технологий и бизнес-аналитики для поддержания эффективной деятельности агропромышленных предприятий обеспечит устойчивость и конкурентоспособность отрасли в долгосрочной перспективе.

Исследование проведено на одном предприятии, что ограничивает генерализацию выводов и перспектив дальнейших исследований по применению современных цифровых инструментов для управления ресурсным потенциалом на предприятиях АПК.

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. Уланова О.И., Позубенкова Э.И. Агропромышленный комплекс как приоритетный сектор продовольственной безопасности региона. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020; (2): 43–47. <https://www.elibrary.ru/vmrcuh>
2. Алимов С.А. Индикаторы продовольственной составляющей экономической безопасности. *Цифровизация экономики и образования: новые технологии. Материалы IV Международной научно-практической конференции*. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. 2024; 182–189. <https://www.elibrary.ru/pdtbxu>
3. Султыгов М.А. Агропромышленный комплекс как приоритетный сектор поддержания продовольственной безопасности региона. *Молодой исследователь: Материалы II Всероссийской студенческой конференции (национальной) научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки*. Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова. 2024; 813–815. <https://www.elibrary.ru/qxqsdf>
4. Шобдоева Н.В., Шадонова Т.М., Бадмаева Р.Б., Ключников Е.П. Государственная поддержка и регулирование сельскохозяйственного производства. *Научно-технологическое развитие агропромышленного комплекса: приоритеты и вызовы. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки*. Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова. 2025; 346–351. <https://www.elibrary.ru/wkoboo>

REFERENCES

1. Ulanova O.I., Pozubenkova E.I. Agroindustrial complex as a priority food security sector of the region. *International Agricultural Journal*. 2020; (2): 43–47 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/vmrcuh>
2. Alimov S.A. Indicators of the food component of economic security. *Digitalization of the economy and education: new technologies. Proceedings of the IV International scientific-practical conference*. Orel: Oryol State University named after I.S. Turgenev. 2024; 182–189 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pdtbxu>
3. Sultygov M.A. Agro-industrial complex as a priority sector for maintaining regional food security. *Young researcher: Proceedings of the II All-Russian student conference with international participation*. Lipetsk: Lipetsk State Technical University. 2024; 813–815 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/qxqsdf>
4. Shobdоеva N.V., Shadonova T.M., Badmaeva R.B., Klyushnikov E.P. State support and regulation of agricultural production. *Scientific and technological development of the agro-industrial complex: priorities and challenges. Proceedings of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the Day of Russian Science*. Ulan-Ude: Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov. 2025; 346–351 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wkoboo>

5. Култыгина И.А., Хохрина О.М. Конкурентоспособность сельскохозяйственных предприятий — оценка и пути повышения. Состояние и перспективы социально-экономического развития региона: взгляд молодых. *Сборник материалов X Международной студенческой научной конференции*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2024; 816–820. <https://www.elibrary.ru/fbccxb>
6. Бесчаснов Ю.В., Асанова Н.А. Конкурентные преимущества организаций АПК. *Научная инициатива: проблемы и пути решения проблем современности. Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов*. Краснодар: Российский университет кооперации (Краснодарский кооперативный институт (филиал)). 2025; 3–6. <https://www.elibrary.ru/pnyuly>
7. Славина В.В., Курьева Н.Е. Факторы повышения конкурентоспособности сельского хозяйства России. *Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства. Сборник статей X Международной научно-практической конференции*. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. 2024; 156–159. <https://www.elibrary.ru/fnzald>
8. Галкин А.И. Применение нейросетей и технологий больших данных в сельском хозяйстве: повышение эффективности и устойчивости агропроизводства. *Аграрная наука*. 2025; (4): 167–171. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-167-171>
9. Красюкова Н.Л. Интеграция блокчейн-технологий в управление агропромышленными холдингами: драйверы эффективности и устойчивого развития. *Аграрная наука*. 2025; (4): 177–179. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-177-179>
10. Молохович М.В. Инновационный инструментарий управления ресурсным потенциалом компании. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D: Экономические и юридические науки*. 2023; (3): 45–48. <https://doi.org/10.52928/2070-1632-2023-65-3-45-48>
11. Буханцева С.Н. Цифровизация бизнес-процессов промышленных предприятий. Монография. М.: Солон-Пресс. 2023; 104. ISBN 978-5-91359-536-2 <https://www.elibrary.ru/gbqprp>
12. Пешкова Г.Ю., Федоров К.Ф. Актуальные тенденции и проблемы цифровизации АПК. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022; (4–4): 150–153. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.139>
13. Муханова М.Н. Трансформация российского села в условиях цифровизации агропромышленного комплекса. Научный результат. *Социология и управление*. 2021; 7(4): 167–179. <https://doi.org/10.18413/2408-9338-2021-7-4-1-1>
14. Леушкина В.В. Цифровизация агропромышленного комплекса: основной элемент повышения конкурентоспособного инновационного развития. *Вопросы инновационной экономики*. 2022; 12(4): 2329–2340. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.4.116615>
15. Зинина Л.И., Прокофьева А.А. Развитие инструментов бизнес-аналитики в условиях цифровой трансформации. *Вестник НИИ гуманитарных наук при Правительстве Республики Мордовия*. 2021; (2): 118–124. <https://www.elibrary.ru/bgibqu>
16. Годин В.В., Белоусова М.Н., Белоусов В.А., Терехова А.Е. Сельское хозяйство в цифровую эпоху: вызовы и решения. *E-Management*. 2020; 3(1): 4–15. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-1-4-15>
17. Стахеева Л.М., Рушицкая О.А., Фетисова А.В., Кружкова Т.И., Батракова С.И. Влияние факторов внутренней и внешней среды предприятия на успешность его деятельности. *Право и управление*. 2024; 6: 66–71. <https://doi.org/10.24412/2224-9133-2024-6-66-71>
18. Баландина Н.Г. Роль инструментов бизнес-анализа в повышении эффективности управления предприятием. *Наукофера*. 2022; (4–2): 337–341. <https://www.elibrary.ru/wxgynq>
19. Белоусов Ю.В. Цифровая экономика: понятие и тенденции развития. *Вестник Института экономики Российской академии наук*. 2021; (1): 26–43. <https://doi.org/10.24412/2073-6487-2021-1-26-43>
20. Измайлов М.К. Методы формирования производственного потенциала промышленного предприятия в цифровых условиях. *Вестник Сибирского университета потребительской кооперации*. 2023; (4–46): 25–36. <https://doi.org/10.48642/9027.2023.11.71.003>
5. Kultygina I.A., Khokhrina O.M. Competitiveness of agricultural enterprises — assessment and ways to improve. *State and prospects of socio-economic development of the region: a view of young people. Collection of materials of the 10th international student scientific conference*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2024; 816–820 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/fbccxb>
6. Beschasnov Yu.V., Asanova N.A. Competitive advantages of agro-industrial complex organizations. *Scientific initiative: problems and solutions to modern problems. Proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, master's students and students*. Krasnodar: Russian University of Cooperation (Krasnodar Cooperative Institute (branch)). 2025; 3–6 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pnyuly>
7. Slavina V.V., Kuryleva N.E. Factors for increasing the competitiveness of Russian agriculture. *Problems and prospects for innovative development of world agriculture. Collection of articles from the X International scientific and practical conference*. Saratov: Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. 2024; 156–159 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/fnzald>
8. Galkin A.I. Application of neural networks and big data technologies in agriculture: increasing the efficiency and sustainability of agricultural production. *Agrarian science*. 2025; (4): 167–171 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-167-171>
9. Krasnyukova N.L. Integration of Blockchain Technologies into the Management of Agro-Industrial Holdings: Drivers of Efficiency and Sustainable Development. *Agrarian science*. 2025; (4): 177–179 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-177-179>
10. Malakhovich M.V. Innovative toolkit for managing the company's resource potential. *Vestnik of Polotsk State University. Part D: Economic and Legal Sciences*. 2023; (3): 45–48 (in Russian). <https://doi.org/10.52928/2070-1632-2023-65-3-45-48>
11. Bukhantseva S.N. Digitalization of business processes of industrial enterprises. Monograph. Moscow: Solon-Press. 2023; 104 (in Russian). ISBN 978-5-91359-536-2 <https://www.elibrary.ru/gbqprp>
12. Peshkova G.Yu., Fedorov K.F. Current trends and problems of digitalization of the agro-industrial complex. *International Research Journal*. 2022; (4–4): 150–153 (in Russian). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.118.4.139>
13. Mukhanova M.N. Transformation of the Russian village in the conditions of digitalization of the agro-industrial complex. *Research Result. Sociology and management*. 2021; 7(4): 167–179 (in Russian). <https://doi.org/10.18413/2408-9338-2021-7-4-1-1>
14. Leushkina V.V. Digitalization of the agro-industrial complex: the main element of increasing competitive innovative development. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2022; 12(4): 2329–2340 (in Russian). <https://doi.org/10.18334/vinec.12.4.116615>
15. Zinina L.I., Prokofieva A.A. Development of business-analytics tools in the conditions of digital transformation. *Bulletin of the Research Institute of the Humanities by the Government of the Republic of Mordovia*. 2021; (2): 118–124 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/bgibqu>
16. Godin V.V., Belousova M.N., Belousov V.A., Terekhova A.E. Agriculture in a digital era: threats and solutions. *E-Management*. 2020; 3(1): 4–15 (in Russian). <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-1-4-15>
17. Stakheeva L.M., Rushitskaya O.A., Fetisova A.V., Kruzhkova T.I., Batrakova S.I. The influence of factors of the internal and external environment of the enterprise on the success of its activities. *Law and Management*. 2024; 6: 66–71. <https://doi.org/10.24412/2224-9133-2024-6-66-71>
18. Balandina N.G. The role of digital business analysis tools in improving the efficiency of enterprise management. *Naukosfera*. 2022; (4–2): 337–341 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wxgynq>
19. Belousov Yu.V. Digital economy: concept and trends of development. *The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*. 2021; (1): 26–43 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2073-6487-2021-1-26-43>
20. Izmailov M.K. Methods for Forming the Production Potential of an Industrial Enterprise in a Digital Environment. *Bulletin of the Siberian University of Consumer Cooperatives*. 2023; (4–46): 25–36 (in Russian). <https://doi.org/10.48642/9027.2023.11.71.003>

21. Измайлов М.К. Оценка производственного потенциала в условиях цифровой трансформации: методические подходы. *Вестник Сибирского университета потребительской кооперации*. 2024; (4–50): 77–88. <https://doi.org/10.48642/4825.2024.44.78.006>

22. Василенко И.А. Бизнес-процессы в условиях цифровизации. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2023; 3–1(97): 33–37. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-3-1-33-37>.

23. Иванова А.А., Смылова О.Ю. Нейросетевые технологии в системе оценки ресурсного потенциала аграрного сектора АПК. *Экономика, предпринимательство и право*. 2024; (10): 5771–5786. <https://doi.org/10.18334/epp.14.10.121808>

ОБ АВТОРАХ

Евгения Сергеевна Тищенко¹

кандидат экономических наук, доцент
vip-evgeniya1201@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2649-7209>

Юлия Александровна Клейменова¹

кандидат экономических наук
20ulya1987@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8868-0503>

Елена Сергеевна Кравченко²

кандидат экономических наук, профессор
krav.elen07@gmail.com

¹Кубанский государственный технологический университет, Московская ул., 2, Краснодар, 350072, Россия

²Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ул. Щорса, 31, Донецк, 283050, Россия

21. Izmailov M.K. Assessment of production potential in the context of digital transformation: methodological approaches. *Bulletin of the Siberian University of Consumer Cooperatives*. 2024; (4–50): 77–88 (in Russian). <https://doi.org/10.48642/4825.2024.44.78.006>

22. Vasilenko I.A. Business processes in the context of digitalization. *Economics and Business: theory and practice*. 2023; 3–1(97): 33–37 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-3-1-33-37>.

23. Ivanova A.A., Smyslova O.Yu. Neural network technology in the system of assessing the resource potential of the agricultural sector of the agro-industrial complex. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2024; (10): 5771–5786 (in Russian). <https://doi.org/10.18334/epp.14.10.121808>

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya Sergeevna Tishchenko¹

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
vip-evgeniya1201@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2649-7209>

Julia Aleksandrovna Kleimenova¹

Candidate of Economic Sciences
20ulya1987@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8868-0503>

Elena Sergeevna Kravchenko²

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
krav.elen07@gmail.com

¹Kuban State Technological University, 2 Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russia

²Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 31 Shchors Str., Donetsk, 283050, Russia

УДК УДК 631.95:504.5:62-912.23

Краткое сообщение



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-209-214

В.Н. Ярыгин ✉

В.Г. Приходько

И.В. Ярыгин

*Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии
наук, Новосибирск, Россия*

✉ yarygin@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию: 15.09.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Ярыгин В.Н., Приходько В.Г.,
Ярыгин И.В.

Адаптация газодинамических защитных технологий для минимизации аэротехногенного загрязнения агроэкосистем

РЕЗЮМЕ

Исследование предлагает методологию снижения аэротехногенного воздействия на агроэкосистемы и рисков деградации почв через адаптацию газодинамических защитных технологий и цифрового двойника. В основе лежит киберфизическая архитектура, интегрирующая данные IoT-датчиков, дистанционного зондирования и БПЛА в геопространственную базу для калибровки моделей машинным обучением.

На гипотетическом полигоне (5000 га) проведено комплексное моделирование: CFD-анализ газодинамических экранов (ветрозащитных полос), гидрологическое моделирование в SWAT и оценка затоплений в HEC-RAS. Результаты агрегированы в интегральный индекс агрориска.

CFD-моделирование выявило нелинейную зависимость эффективности экрана от пористости. Чрезмерная плотность увеличивает турбулентность и сокращает зону защиты, тогда как умеренная пористость (35–45%) обеспечивает оптимальный баланс. Трехрядная конфигурация (~38,7%) демонстрирует максимальную эффективность. SWAT подтвердил, что переход на no-till с покровными культурами снижает сток на 64%, смыв почвы на 88% и потери биогенов на 75–77%. HEC-RAS показал значительный рост масштабов затоплений при экстремальных паводках, необходимость оптимизации землепользования.

Интегральная оценка доказала, что комбинация оптимизированных экранов с почвозащитными практиками снижает совокупный риск на 62,8%, а ожидаемые потери урожая — до 71,2%, демонстрируя синергетический эффект. Цифровой двойник служит инструментом для проектирования и адаптивного управления, перенося принципы газодинамической защиты из космической отрасли в контекст точного земледелия.

Ключевые слова: аэротехногенное загрязнение, газодинамические экраны, агроэкосистемы, космические технологии, точное земледелие

Для цитирования: Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В. Адаптация газодинамических защитных технологий для минимизации аэротехногенного загрязнения агроэкосистем. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 209–214.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-209-214>

Short communications



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-209-214

Vyacheslav N. Yarygin ✉

Viktor G. Prikhodko

Igor V. Yarygin

*Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russia*

✉ yarygin@itp.nsc.ru

Received by the editorial office: 15.09.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Yarygin V.N., Prikhodko V.G., Yarygin I.V.

Adaptation of gas-dynamic protective technologies to minimize aerotechnogenic pollution of agroecosystems

ABSTRACT

The study suggests a methodology for reducing the aerotechnogenic impact on agroecosystems and the risks of soil degradation through the adaptation of gas-dynamic protective technologies and a digital twin. It is based on a cyber-physical architecture that integrates data from IoT sensors, remote sensing and UAVs into a geospatial database for model calibration by machine learning.

A comprehensive simulation was carried out at a hypothetical landfill (5000 ha): CFD analysis of gas dynamic screens (wind protection strips), hydrological modeling in SWAT and flood assessment in HEC-RAS. The results are aggregated into an integrated agro risk index.

CFD modeling revealed a nonlinear dependence of screen efficiency on porosity. Excessive density increases turbulence and reduces the protection zone, while moderate porosity (35–45%) ensures optimal balance. The three-row configuration (~38.7%) demonstrates maximum efficiency. SWAT confirmed that switching to no-till with cover crops reduces runoff by 64%, soil washout by 88% and nutrient loss by 75–77%. HEC-RAS has shown a significant increase in the scale of flooding during extreme floods, and the need to optimize land use.

The integrated assessment proved that the combination of optimized screens with soil protection practices reduces the total risk by 62.8%, and expected crop losses by up to 71.2%, demonstrating a synergistic effect. The digital twin serves as a tool for design and adaptive management, transferring the principles of gas dynamic protection from the space industry to the context of precision agriculture.

Key words: aerotechnogenic pollution, gas-dynamic screens, agroecosystems, space technologies, precision agriculture

For citation: Yarygin V.N., Prikhodko V.G., Yarygin I.V. Adaptation of gas-dynamic protective technologies to minimize aerotechnogenic pollution of agroecosystems. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 209–214 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-209-214>

Введение/Introduction

Проблема деградации сельскохозяйственных земель достигла критического масштаба, представляя прямую угрозу глобальной продовольственной безопасности и устойчивости экосистем [1–5]. Согласно последним оценкам, от умеренной до сильной деградации подвержены около 52% всех сельскохозяйственных земель в мире, что подрывает благосостояние более 3,2 млрд человек. Ежегодно площадь поврежденных земель увеличивается примерно на 1 млн кв. км, а общая их площадь уже превышает 15 млн кв. км, что сопоставимо с площадью Антарктиды [6]. Наиболее остро проблема стоит в засушливых регионах, на которые приходится до 43% возделываемых земель [7].

Прогнозы вызывают еще большую тревогу: при сохранении текущих тенденций к 2050 году до 95% почвенного покрова планеты может оказаться деградированным, что сделает его непригодным для ведения сельского хозяйства. Эта тенденция свидетельствует о системном кризисе в управлении земельными ресурсами, требующем немедленного перехода к новым, более эффективным парадигмам защиты [8–13].

Цели исследования — разработать и апробировать на основе комплексного численного моделирования (CFD, SWAT, HEC-RAS) методику адаптации газодинамических защитных технологий (ветрозащитных лесополос) и почвозащитных агроприемов для минимизации аэротехногенного воздействия на агроэкосистемы с использованием платформы цифрового двойника.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Концептуальная основа настоящего исследования базируется на создании комплексного цифрового двойника агроэкосистемы — киберфизической системы, представляющей собой не просто статичную 3D-модель, а динамическую, двунаправленно связанную виртуальную копию реальной сельскохозяйственной территории [12]. В отличие от традиционного моделирования, цифровой двойник обеспечивает непрерывный обмен данными между физическим объектом и его виртуальным представлением, что позволяет модели не только отражать текущее состояние системы, но и влиять на него через управляющие воздействия.

Архитектура предлагаемого цифрового двойника является многоуровневой и включает физический, коммуникационный и кибернетический слои. Физический слой отвечает за сбор данных и состоит из сети гетерогенных источников информации. К ним относятся наземные IoT-датчики (влажности и температуры почвы, метеопараметры), платформы дистанционного зондирования Земли (спутниковые снимки для оценки вегетационных индексов и влагообеспеченности) и

беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные мультиспектральными и лидарными камерами для получения сверхвысокодетальных цифровых моделей рельефа и состояния посевов. Коммуникационный слой обеспечивает передачу данных в режиме, близком к реальному времени, на кибернетический уровень. Здесь происходят слияние (data fusion) и обработка данных с использованием алгоритмов машинного обучения для выявления скрытых закономерностей и калибровки симуляционных моделей, формируя единую геопространственную базу данных.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Анализ исходных показателей (табл. 1) демонстрирует неоднородность процесса профессиональной адаптации молодых педагогов сельских школ, что подтверждается значительными стандартными отклонениями по всем измеряемым параметрам.

Для апробации разработанной методологии было проведено комплексное моделирование для гипотетической сельскохозяйственной территории площадью 5000 га. Территория характеризуется неоднородным рельефом с перепадом высот до 150 м, наличием нескольких типов почв (от супесчаных до тяжелосуглинистых) и различными видами землепользования, включая пашню, пастбища и многолетние насаждения.

Ландшафт подвержен воздействию преобладающих западных ветров и примыкает к речной системе с риском весенних паводков. Эффективность защитных мероприятий оценивали по набору ключевых показателей, напрямую отражающих уровень агроэкологической безопасности: эффективность снижения скорости ветра, объем смыва почвы и потерь биогенных элементов, а также площадь затопления при экстремальных гидрологических событиях. Эти индикаторы были выбраны как прямые количественные метрики для оценки угроз эоловой и водной эрозии, деградации почвенного плодородия и риска потери урожая от наводнений.

Первым этапом исследования стала оптимизация конструкций ветрозащитных лесополос с использованием CFD-моделирования. Были проанализированы различные сценарии конфигурации лесополос, отличающиеся количеством рядов, высотой и, что наиболее важно, оптической пористостью, которая является ключевым параметром, определяющим аэродинамику обтекания.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1, где для каждого варианта рассчитаны показатели ветрозащитной эффективности. В качестве базового сценария рассматривалась существующая однорядная изреженная лесополоса с высокой пористостью.

Таблица 1. Сравнительный анализ эффективности ветрозащитных лесополос различной структуры по результатам CFD-моделирования

Table 1. Comparative analysis of the effectiveness of windbreak forest belts of different structures based on the results of CFD modeling

ID варианта	Количество рядов	Высота, м	Оптическая пористость, %	Максимальное снижение скорости ветра, %	Протяженность зоны защиты (> 20% снижения скорости), Н	Индекс турбулентности в заветренной зоне
CFD-01 (базовый)	1	12,5	63,8	31,7	11,4	0,18
CFD-02	1	12,5	41,2	68,5	24,7	0,29
CFD-03	1	12,5	22,5	85,3	14,1	0,45
CFD-04	2	15,0	44,6	74,1	28,3	0,25
CFD-05	2	15,0	25,9	89,6	18,5	0,41
CFD-06	3	15,0	38,7	81,2	32,6	0,22

Таблица 2. Оценка влияния агротехнических мероприятий на показатели поверхностного стока и смыва почвы (на основе моделирования SWAT)

Table 2. Assessment of the impact of agrotechnical measures on surface runoff and soil erosion indicators (based on SWAT modeling)

ID сценария	Метод обработки почвы	Тип севооборота	Среднегодовой поверхностный сток, мм	Смыв почвы, т/га/год	Потери азота, кг/га/год	Потери фосфора, кг/га/год
SWAT-01 (базовый)	Отвальная вспашка	Монокультура	88,4	12,73	25,81	1,94
SWAT-02	Минимальная обработка	3-польный	61,2	6,18	15,47	1,15
SWAT-03	Нулевая обработка (No-Till)	3-польный	45,7	3,85	10,92	0,81
SWAT-04	No-Till + покровные культуры	4-польный	31,9	1,52	6,33	0,45

Анализ данных (табл. 1) выявляет сложную нелинейную зависимость между структурой лесополосы и ее защитными функциями. Сравнение вариантов CFD-01, CFD-02 и CFD-03 для однорядной полосы показывает, что уменьшение оптической пористости с 63,8 до 22,5% приводит к почти трехкратному росту максимального снижения скорости ветра (с 31,7 до 85,3%). Однако этот эффект достигается ценой значительного сокращения протяженности защищенной зоны и резкого роста турбулентности.

Слишком плотная лесополоса (CFD-03) действует подобно сплошной стене, заставляя основной поток воздуха перетекать через верх, что вызывает интенсивные вихревые движения непосредственно за ней и быстрое восстановление скорости ветра. Наибольшая протяженность защитной зоны (24,7 Н) достигается при умеренной пористости 41,2% (CFD-02), что подтверждает теоретические представления об оптимальной «продуваемой» конструкции.

Многорядные конструкции (CFD-04, CFD-05, CFD-06) демонстрируют более высокие абсолютные показатели защиты. Так, трехрядная полоса оптимальной пористости (CFD-06 38,7%) обеспечивает наибольшую дальность защиты (32,6 Н) при высоком уровне снижения скорости ветра (81,2%) и умеренной турбулентности.

Математический анализ показывает, что оптимальный диапазон пористости для данной территории находится в пределах 35,0–45,0%. Выход за эти пределы приводит либо к недостаточной эффективности (при пористости > 50,0%), либо к созданию зон повышенной турбулентности и сокращению защищаемой площади (при пористости < 30,0%). Таким образом, цифровой двойник позволяет количественно обосновать выбор

проектного решения, обеспечивающего наилучший баланс между степенью и дальностью ветрозащитного действия.

На втором этапе с помощью модели SWAT была проведена оценка влияния различных агротехнических мероприятий на процессы водной эрозии и потерь биогенных элементов. В качестве базового сценария была принята традиционная для региона система земледелия, основанная на ежегодной глубокой отвальной вспашке и монокультурном выращивании пропашных культур. Ей противопоставлялись современные почвозащитные технологии.

Результаты моделирования сведены в таблицу 2.

Данные таблицы 2 наглядно демонстрируют высокую эффективность почвозащитных технологий. Переход от традиционной отвальной вспашки (SWAT-01) к минимальной обработке (SWAT-02) уже позволяет сократить смыв почвы более чем в 2 раза (с 12,73 до 6,18 т/га/год), а потери азота — на 40,1%. Это объясняется сохранением на поверхности поля части пожнивных остатков, которые защищают почву от ударного действия дождевых капель и замедляют поверхностный сток.

Внедрение нулевой обработки (No-Till) в сценарии SWAT-03 дает еще более выраженный эффект, снижая смыв почвы на 69,7% по сравнению с базовым вариантом. Максимальная же эффективность достигается при сочетании технологии No-Till с использованием покровных культур в зимний период (SWAT-04). В этом случае поверхностный сток сокращается на 63,9%, смыв почвы — на 88,1%, а потери азота и фосфора — на 75,5% и 76,8% соответственно. Такой результат обусловлен синергетическим эффектом: постоянный растительный покров и мульча из растительных

Таблица 3. Моделирование зон затопления сельскохозяйственных угодий при различных сценариях паводков (на основе модели HEC-RAS)

Table 3. Modeling of agricultural land flood zones under different flood scenarios (based on the HEC-RAS model)

Период повторяемости паводка, лет	Пиковый расход воды, м ³ /с	Площадь затопления, га	Доля затопленных с.-х. угодий, %	Средняя глубина затопления на с.-х. угодьях, м	Максимальная глубина, м
10	855,7	488,6	9,77	0,83	2,15
50	1210,3	895,2	17,90	1,46	3,88
100	1452,1	1176,9	23,54	1,92	5,04

Таблица 4. Интегральная оценка агроэкологического риска и эффективности защитных мероприятий в среде цифрового двойника

Table 4. Integrated assessment of agroecological risk and the effectiveness of protective measures in the digital twin environment

ID участка	Исходный интегральный индекс риска	Сценарий 1-й: оптимизация лесополос (индекс риска)	Сценарий 2-й: внедрение почвозащитных технологий (индекс риска)	Сценарий 3-й: комплексный подход (сценарий 1-й + 2-й) (индекс риска)	Прогнозируемое снижение потерь урожайности, %
Участок 1-й (плакор)	0,78	0,45	0,51	0,23	58,7
Участок 2-й (склон)	0,89	0,72	0,33	0,19	71,2
Участок 3-й (пойма)	0,65	0,61	0,58	0,55	16,4

остатков практически полностью предотвращают эрозию, а развитая корневая система улучшает структуру почвы и ее водопроницаемость.

Третий этап моделирования был посвящен оценке рисков затопления с использованием модели HEC-RAS. Были рассчитаны зоны затопления для паводков с различным периодом повторяемости, что позволило оценить уязвимость сельскохозяйственных угодий к гидрологическим угрозам.

Результаты гидравлического моделирования показывают нелинейный рост площади и глубины затопления с увеличением периода повторяемости паводка. При паводке, случающемся в среднем раз в 10 лет, в зону затопления попадает почти 10% сельскохозяйственных земель, при этом средняя глубина воды на них составляет 0,83 м, что уже является критичным для большинства культур. При 100-летнем паводке затопляется уже почти четверть (23,54%) всех угодий, а средняя глубина превышает 1,9 м, что гарантирует полную потерю урожая и может привести к длительному вымоканию и деградации почв. Пространственный анализ карт затопления, сгенерированных в цифровом двойнике, позволяет выявить наиболее уязвимые участки, расположенные в низкой пойме реки.

Эта информация является критически важной для разработки стратегий адаптивного землепользования, например вывода наиболее ценных и чувствительных к затоплению культур из зон высокого риска и размещения там сенокосов или пастбищ, более устойчивых к временному переувлажнению.

Финальным этапом исследования стала интегральная оценка агроэкологического риска и эффективности комплексных защитных мероприятий. Для каждого участка территории был

рассчитан исходный интегральный индекс риска, учитывающий взвешенные показатели вероятности эоловой эрозии, водной эрозии и затопления. Затем были смоделированы эффекты от применения различных защитных стратегий.

Анализ интегральных показателей, представленных в таблице 4, наилучшим образом демонстрирует преимущества системного подхода, реализуемого в рамках цифрового двойника.

Для участка на плакоре (участок 1-й), где доминирует ветровая эрозия, оптимизация лесополос (сценарий 1-й) снижает индекс риска на 42,3%, тогда как почвозащитные технологии (сценарий 2-й) — лишь на 34,6%. Для участка на склоне (участок 2-й), где основной угрозой является водная эрозия, ситуация обратная: сценарий 2-й снижает риск на 62,9%, а сценарий 1-й — всего на 19,1%. Наиболее показательным, что комплексный подход (сценарий 3-й) для этих участков дает синергетический эффект: снижение риска составляет 70,5% и 78,7% соответственно, что превышает простую сумму эффектов от отдельных мероприятий. Это подчеркивает взаимосвязанность деградационных процессов и необходимость одновременного воздействия на разные факторы.

Для пойменного участка (участок 3-й), где главным риском является затопление, агротехнические и ветрозащитные меры оказывают слабое влияние на интегральный индекс, что указывает на необходимость применения иных, инженерно-гидротехнических решений, моделирование которых может быть интегрировано в цифровой двойник.

Прогнозируемое снижение потерь урожайности напрямую коррелирует со снижением индекса риска, достигая 71,2% на наиболее отзывчивых к комплексной защите участках.

Выводы/Conclusions

Проведенное исследование продемонстрировало высокий потенциал концепции цифрового двойника как инструмента для комплексного моделирования и оптимизации систем защиты сельскохозяйственных территорий. Количественный анализ показал, что целенаправленное проектирование защитных устройств и агротехнических систем на основе данных мультифизического моделирования способно кардинально снизить уровень агроэкологических рисков. В частности, было установлено, что оптимизация структуры ветрозащитных лесополос до достижения оптической пористости в диапазоне 38,0–45,0% позволяет увеличить

протяженность зоны эффективной защиты более чем в 2,5 раза по сравнению с изреженными насаждениями.

Внедрение комплекса современных почвозащитных агротехнологий, включающего нулевую обработку и использование покровных культур, способно сократить смыв почвы и потери биогенных элементов на 75,0–88,0% по сравнению с традиционной отвальной вспашкой. Интегральная оценка показала, что применение комплексных, адаптированных к конкретным условиям ландшафта защитных стратегий позволяет снизить общий индекс агроэкологического риска в среднем на 62,8% и сократить прогнозируемые потери урожайности до 71,2%.

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 соответствии с государственным заданием ИТ СО РАН № 121031800218-5.

FUNDING

The research was conducted in accordance with a state assignment to the Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. 121031800218-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайленко И.М., Якушев В.П. Дистанционное зондирование Земли в сельском хозяйстве. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2016; (6): 12–16. <https://www.elibrary.ru/wzhnon>
2. Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А. Достижение нейтрального баланса деградации земель — путь преодоления тихого кризиса планеты. *Земля и Вселенная*. 2024; 5(359): 5–17. <https://doi.org/10.7868/S0044394824050013>
3. Гаврилова Н.Г., Мухаметзянов Р.Р. Деградация земель в макрорегионах мира и ее основные причины в Африке. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2024; (11): 102–109. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-11-102-109>
4. Жумагалиева Н., Айтхожаева Г., Пентаев Т., Жилдикбаева А. Анализ проблем неиспользования земель сельскохозяйственного назначения с учетом их деградации. *Izdenister Natigeler*. 2024; 1(101): 220–228. <https://doi.org/10.37884/1-2024/22>
5. Гаврилова Н.Г. Состояние и перспективы продовольственной безопасности в странах Западной Африки в условиях деградации сельскохозяйственных земель. *International Agricultural Journal*. 2024; 3(67). https://doi.org/10.55186/25876740_2024_8_3_18
6. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектро радиометра MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005; 2(2): 228–236. <https://www.elibrary.ru/ndpntl>
7. Блохин Ю.И., Белов А.В., Блохина С.Ю. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеословий для интерпретации данных дистанционного зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019; 16(3): 87–95. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95>
8. Якушев В.П. и др. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019; 16(3): 24–32. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32>
9. Артамонова Е.О., Шведов В.В. Управление земельными ресурсами: вызовы и стратегии решения. *Экономические исследования и разработки*. 2024; (3): 24–29. <https://www.elibrary.ru/wrtwdi>

REFERENCES

1. Mikhaylenko I.M., Yakushev V.P. The Earth's remote sensing in agriculture. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2016; (6): 12–16 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wzhnon>
2. Kust G.S., Andreeva O.V., Lobkovsky V.A. Achieving a neutral balance of land degradation: a way to overcome the planet's silent crisis. *Earth and Universe (Zemlya i Vselennaya)*. 2024; 5(359): 5–17 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0044394824050013>
3. Gavrilova N.G., Mukhametzyanov R.R. Land degradation in the world's macroregions and its main causes in Africa. *Economics of agricultural and processing enterprises*. 2024; (11): 102–109 (in Russian). <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2024-0-11-102-109>
4. Zhumagalieva N., Aitkhozaeva G., Pentaev T., Zhiidikbaeva A. Analysis of the problems of unused agricultural land, taking into account its degradation. *Research, results*. 2024; 1(101): 220–228 (in Russian). <https://doi.org/10.37884/1-2024/22>
5. Gavrilova N.G. Status and prospects of food security in West African countries in the context of agricultural land degradation. *International Agricultural Journal*. 2024; 3(67) (in Russian). https://doi.org/10.55186/25876740_2024_8_3_18
6. Bartalev S.A., Lupyan E.A., Neyshadt I.A., Savin I.Yu. Remote assessment of agricultural land parameters using satellite data of the spectroradiometer MODIS. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2005; 2(2): 228–236 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ndpntl>
7. Blokhin Yu.I., Belov A.V., Blokhina S.Yu. Integrated system for control of soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2019; 16(3): 87–95 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95>
8. Yakushev V.P. et al. Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2019; 16(3): 24–32 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32>
9. Artamonova E.O., Shvedov V.V. Land resources management: challenges and solution strategies. *Economic research and development*. 2024; (3): 24–29 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wrtwdi>

10. Papaskiri T.V., Lipski S.A., Fatkulina A.V. Problems of information support for the implementation of the state program for the involvement of unused agricultural land in economic turnover and ways to solve them. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2024; 1405(1): 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1405/1/012013>

11. Езиев М.И., Шекихачева Л.З., Шибзухова З.С. Экологическая безопасность аграрного землепользования в контексте системного управления. *АгроЭкоИнфо*. 2025; 2(68). <https://doi.org/10.51419/202152208>

12. Еремин С.Г. Проблемы и приоритеты совершенствования управления земельными ресурсами в России. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2025; (5): 183–188. <https://www.elibrary.ru/voravo>

13. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Газодинамические защитные устройства для двигателей ориентации космических аппаратов и орбитальных станций. *Концепция, модельные и натурные эксперименты. Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2016; 17(4): 473–493. <https://www.elibrary.ru/ynfulv>

10. Papaskiri T.V., Lipski S.A., Fatkulina A.V. Problems of information support for the implementation of the state program for the involvement of unused agricultural land in economic turnover and ways to solve them. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2024; 1405(1): 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1405/1/012013>

11. Eziev M.I., Shekihacheva L.Z., Shibzukhova Z.S. Environmental Safety of Agricultural Land Use in the Context of System Management. *AgroEcolInfo*. 2025; 2(68) (in Russian). <https://doi.org/10.51419/202152208>

12. Eremin S.G. Problems and Priorities for Improving Land Resources Management in Russia. *Forging and Stamping Production. Material Pressure Processing (Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem)*. 2025; (5): 183–188 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/voravo>

13. Gerasimov Yu.I., Yarygin V.N. Gas-Dynamical Protective Devices for Orientation Thrusters of Space Vehicles and Orbital Stations. Conceptual Design, Model and On-Orbit Experiments. *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*. 2016; 17(4): 473–493 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ynfulv>

ОБ АВТОРАХ

Вячеслав Николаевич Ярыгин

доктор технических наук,
главный научный сотрудник
yarygin@itp.nsc.ru

Виктор Григорьевич Приходько

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
prikhodko@itp.nsc.ru

Игорь Вячеславович Ярыгин

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
igor.yarygin@mail.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук,
пр-т Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090,
Россия

ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav Nikolaevich Yarygin

Doctor of Technical Sciences,
Chief Researcher
yarygin@itp.nsc.ru

Viktor Grigoryevich Prikhodko

Candidate of Physico-Mathematical Sciences,
Senior Researcher
prikhodko@itp.nsc.ru

Igor Vyacheslavovich Yarygin

Candidate of Physico-Mathematical Sciences,
Senior Researcher
igor.yarygin@mail.ru

Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090,
Russia

УДК 373.3/.5.011.3-051:5/6

Краткое сообщение



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-215-220

Л.А. Паршутина ✉

О.Н. Рыжова

¹Федеральный научный центр
психологических
и междисциплинарных
исследований, Москва, Россия

²Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

✉ parshutinala@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.09.2025

Одобрена после рецензирования: 11.10.2025

Принята к публикации: 26.10.2025

© Паршутина Л.А., Рыжова О.Н.

Педагогические кадры для сельских школ по естественно-научным дисциплинам: современные решения

РЕЗЮМЕ

Кадровый дефицит педагогов естественно-научного профиля в сельских школах является критическим вызовом для качественного образования в отдаленных территориях РФ.

Цель исследования — анализ современных подходов к подготовке и привлечению педагогических кадров в сельские учреждения.

Методология включает анализ данных Росстата и Минпросвещения за 2019–2024 гг., анкетирование 60 учителей из 23 сельских школ 8 субъектов РФ, экспертные интервью с 15 руководителями и контент-анализ региональных программ. Выявлена критическая укомплектованность: математика — 67,1%, физика — 58,3%, химия — 52,8%, биология — 70,4%. Средний возраст педагогов 49,2 года, доля пенсионного возраста 36,7%, текучесть кадров 31,6% ежегодно. Целевая подготовка показывает эффективность закрепления выпускников 76,8%, цифровые технологии повышают доступность образования на 28,3%. Главные барьеры: заработная плата на 24,1% ниже городской, 69,8% педагогов с жилищными проблемами.

Разработана комплексная система мер: целевое распределение с обязательной трехлетней отработкой, жилищное обеспечение, социальные льготы для молодых специалистов. Модель профессиональной поддержки интегрирует целевую подготовку выпускников сельских школ, обязательное наставничество и регулярное повышение квалификации на базе школ. Реализация мер обеспечит повышение укомплектованности до 85–90% за 5–7 лет при федеральном финансировании 12,4 млрд рублей ежегодно.

Ключевые слова: сельские школы, педагогические кадры, естественно-научные дисциплины, подготовка учителей, цифровизация образования, кадровый дефицит

Для цитирования: Паршутина Л.А., Рыжова О.Н. Педагогические кадры для сельских школ по естественно-научным дисциплинам: современные решения. *Аграрная наука*. 2025; 400(11): 215–220.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-215-220>

Short communications



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-400-11-215-220

Lyudmila A. Parshutina ✉

Olga N. Ryzhova

¹Federal Scientific Center for
Psychological and Interdisciplinary
Research, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

✉ parshutinala@mail.ru

Received by the editorial office: 15.09.2025

Accepted in revised: 11.10.2025

Accepted for publication: 26.10.2025

© Parshutina L.A., Ryzhova O.N.

Teaching staff for rural schools in natural sciences: modern solutions

ABSTRACT

The shortage of teachers with a natural science background in rural schools is a critical challenge for providing quality education in remote areas of the Russian Federation.

The purpose of the study is to analyze modern approaches to training and attracting teaching staff to rural institutions.

The methodology includes analysis of data from Rosstat and the Ministry of Education for 2019–2024, a survey of 60 teachers from 23 rural schools across 8 Russian regions, expert interviews with 15 administrators, and content analysis of regional programs. A critical staffing level was identified: mathematics — 67.1%, physics — 58.3%, chemistry — 52.8%, biology — 70.4%. The average age of teachers is 49.2 years, the share of those of retirement age is 36.7%, and staff turnover is 31.6% annually. Targeted training demonstrates a 76.8% retention rate of graduates, and digital technologies increase access to education by 28.3%. The main barriers are salaries 24.1% lower than in cities and housing problems for 69.8% of teachers.

A comprehensive system of measures has been developed: targeted job placement with a mandatory three-year employment period, housing provision, and social benefits for young specialists. The professional support model integrates targeted training of rural school graduates, mandatory mentoring, and regular professional development at school-based centers. Implementation of these measures will increase staffing levels to 85–90% within 5–7 years with annual federal funding of 12.4 billion rubles.

Key words: rural schools, teaching staff, natural science disciplines, teacher training, digitalization of education, staff shortage

For citation: Parshutina L.A., Ryzhova O.N. Teaching staff for rural schools in natural sciences: modern solutions. *Agrarian science*. 2025; 400(11): 215–220 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-400-11-215-220>

Введение/Introduction

Проблема кадрового обеспечения сельских школ педагогами естественно-научного профиля актуальна в условиях реализации Стратегии научно-технологического развития РФ и повышения качества образования в отдаленных территориях [1]. Отток квалифицированных кадров из сельской местности создает препятствия для равного доступа к качественному естественно-научному образованию [2, 3].

Цифровизация открывает возможности преодоления географических ограничений, но требует специальной подготовки педагогов [4]. Исследования подчеркивают важность преемственности традиций и инноваций в подготовке учителей [16], необходимость совершенствования отбора будущих педагогов [17] и интеграции образования, науки и бизнеса в контексте развития АПК [5].

Профессиональное развитие учителей в условиях дистанционного обучения становится ключевым фактором качества образования в сельских школах [6]. Советская система государственного распределения выпускников вузов в 1960–1980 гг. с обязательной трехлетней отработкой, жилищными гарантиями и льготами обеспечивала укомплектованность сельских школ на уровне 92–95%. Современная адаптация требует добровольно-обязательных механизмов, сочетающих государственные инвестиции с обязательствами по работе в приоритетных регионах.

Анализ литературы выявляет три направления исследований. Первое фокусируется на условиях повышения качества образования в сельских школах, показывая, что школы с полной укомплектованностью квалифицированными учителями естественных наук демонстрируют результаты, сопоставимые с городскими [7]. Второе анализирует подготовку кадров для АПК в цифровой экономике, подчеркивая необходимость формирования компетенций применения цифровых технологий [8, 9]. Третье исследует кадровое обеспечение как элемент воспроизводства человеческого капитала для сельской экономики [10].

Ключевые понятия: «сельские школы» — учреждения в населенных пунктах до 12 тыс. человек с ограниченной материально-технической базой и малочисленным контингентом [11]; «педагогические кадры естественно-научного профиля» — учителя математики, физики, химии, биологии; «цифровизация образования» — интеграция цифровых технологий для повышения качества и доступности обучения [12]; «кадровый дефицит» — несоответствие между потребностью и наличностью квалифицированных педагогов.

Пробелы в исследованиях: недостаточно изучены управленческие подходы к решению кадрового дефицита на региональном уровне [13–15]; слабо разработаны вопросы подготовки кадров для АПК в системе непрерывного образования [16, 17]; требует изучения влияние качества образования

на социально-трудовые отношения в сельской местности и психолого-педагогические основания прогнозирования профессионального образования [18–21].

Актуальность исследования определяется необходимостью научно обоснованных подходов к решению кадровых проблем сельских школ. Уникальность — в комплексном анализе факторов привлечения и закрепления педагогов с учетом специфики естественно-научных дисциплин и цифровизации.

Новизна — разработка методологического аппарата оценки эффективности моделей подготовки и поддержки кадров. Практическая значимость — возможность использования результатов для совершенствования федеральной и региональной политики развития сельского образования.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Методологической основой является системный подход, рассматривающий кадровое обеспечение сельских школ как многофакторную систему с институциональными, социально-экономическими, психолого-педагогическими и технологическими компонентами.

Исследование базируется на принципах объективности, системности, комплексности и достоверности. Исследование проводили в марте — ноябре 2024 года в четыре этапа: 1) март — апрель — анализ статистических данных Росстата, Минпросвещения РФ, региональных органов управления образованием за 2019–2024 гг.; 2) май — июль — разработка инструментария и анкетирование педагогов; 3) август — сентябрь — экспертные интервью с руководителями школ и специалистами управления образованием; 4) октябрь — ноябрь — обработка и анализ данных.

Статистическую обработку выполняли в SPSS 26.0: описательная статистика, корреляционный анализ Пирсона, критерий Манна — Уитни для сравнения независимых групп, критерий Краскела — Уоллиса для нескольких групп. Качественные данные обрабатывали методом тематического контент-анализа в ATLAS.ti 9.0.

Проведен сравнительный анализ международного опыта на основе 47 научных публикаций и документов образовательной политики США, Канады, Австралии, Финляндии, Германии за 2015–2024 гг. с использованием баз Scopus, Web of Science, ERIC.

Критерии включения: публикация в рецензируемых журналах, эмпирические данные о результативности программ привлечения педагогов, описание механизмов господдержки.

Исторический анализ советского опыта базировался на архивных материалах Минпросвещения РСФСР, статистике ЦСУ СССР за 1960–1990 гг., мемуарной литературе и интервью с 12 педагогами-ветеранами.

Результаты и обсуждение /
Results and discussion

Анализ официальных статистических данных Росстата и Минпросвещения России за 2024 г. выявил критическую ситуацию с кадровым обеспечением сельских школ учителями естественно-научных дисциплин. По данным формы федерального статистического наблюдения ОО-1, общая численность сельских общеобразовательных организаций в РФ составляет 24 163 ед. (41,8% от общего количества школ), в которых обучаются 3 419 267 человек (19,7% от общей численности школьников).

Укомплектованность педагогическими кадрами по естественно-научным дисциплинам характе-

ризуется значительным дефицитом во всех предметных областях (табл. 1).

По результатам проведенного анкетирования 60 педагогов естественно-научного профиля установлено, что возрастная структура характеризуется преобладанием работников старших возрастных групп. Средний возраст составляет 49,2 года при стандартном отклонении 11,7 лет. Возрастное распределение следующее: до 30 лет — 7 человек (11,7%), 30–40 лет — 11 человек (18,3%), 40–50 лет — 16 человек (26,7%), 50–60 лет — 14 человек (23,3%), свыше 60 лет — 12 человек (20,0%). Педагогический стаж респондентов варьирует от 2 до 38 лет, при этом средний стаж составляет 22,4 года (табл. 2).

Таблица 1. Укомплектованность сельских школ РФ учителями естественно-научных дисциплин в 2024 г.
Table 1. Staffing of rural schools in the Russian Federation with natural science teachers in 2024

Дисциплина	Нормативная потребность, чел.	Фактическая численность, чел.	Укомплектованность, %	Дефицит, чел.
Математика	35 187	23 610	67,1	11 577
Физика	29 076	16 951	58,3	12 125
Химия	26 341	13 908	52,8	12 433
Биология	30 429	21 422	70,4	9007
Итого	121 033	75 891	62,7	45 142

Примечание: данные рассчитаны на основе статистической отчетности Минпросвещения России форма ОО-1 за 2024 г. Нормативная потребность определена исходя из средней наполняемости сельских классов 13,7 учащихся, нормы педагогической нагрузки 18 академических часов в неделю при 34 учебных неделях в году и учебной программе: математика — 5–6 ч. в неделю в 5–11-х классах, физика — 2–3 ч. в 7–11-х классах, химия — 2–3 ч. в 8–11-х классах, биология — 1–2 ч. в 5–11-х классах. Расчеты выполнены с учетом коэффициента совмещения дисциплин K = 1,4.

Таблица 2. Характеристика выборки респондентов анкетирования (n = 60)
Table 2. Characteristics of the sample of respondents to the survey (n = 60)

Характеристика	Категория	Количество, чел.	Доля, %
Возраст	До 30 лет	7	11,7
	30–40 лет	11	18,3
	40–50 лет	16	26,7
	50–60 лет	14	23,3
	Свыше 60 лет	12	20,0
Пол	Мужской	19	31,7
	Женский	41	68,3
Преподаваемые предметы	Математика	23	38,3
	Физика	14	23,3
	Химия	11	18,3
	Биология	18	30,0
Педагогический стаж	До 5 лет	9	15,0
	5–15 лет	16	26,7
	15–25 лет	19	31,7
	Свыше 25 лет	16	26,7

Примечание: сумма процентов по предметам превышает 100, поскольку многие педагоги ведут несколько дисциплин. В среднем один педагог преподает 1,8 предмета естественно-научного цикла.

Анализ условий профессиональной деятельности выявил системные проблемы в обеспечении педагогического процесса. Учебную нагрузку свыше нормативных 18 часов в неделю имеют 48 респондентов (80,0%), при этом 23 педагога (38,3%) работают с нагрузкой свыше 30 часов в неделю. Преподавание нескольких предметов характерно для 51 педагога (85,0%): два предмета ведут 29 человек (48,3%), три предмета — 18 (30,0%), четыре и более — 4 человека (6,7%).

Материально-техническую базу как удовлетворительную или хорошую (4–5 баллов по 5-балльной шкале) оценивают лишь 17 педагогов (28,3%), как неудовлетворительную (1–2 балла) — 31 педагог (51,7%). Полностью укомплектованная лаборантская имеется только в 3 школах из 23 обследованных (13,0%), частично укомплектована в 8 школах (34,8%), отсутствует в 12 школах (52,2%) (табл. 3).

Таблица 3. Условия профессиональной деятельности педагогов сельских школ (n = 60)
Table 3. Conditions of professional activity of teachers in rural schools (n = 60)

Показатель	Градация	Количество ответов	Доля, %
Учебная нагрузка	До 18 часов	4	6,7
	18–24 часа	8	13,3
	25–30 часов	25	41,7
	Свыше 30 часов	23	38,3
Количество предметов	1 предмет	9	15,0
	2 предмета	29	48,3
	3 предмета	18	30,0
	4+ предметов	4	6,7
Материально-техническая база (оценка по 5-балльной шкале)	Неудовлетворительная (1–2 балла)	31	51,7
	Удовлетворительная (3 балла)	12	20,0
	Хорошая или отличная (4–5 баллов)	17	28,3
Наполняемость классов	До 10 человек	28	46,7
	10–15 человек	24	40,0
	15–20 человек	7	11,7
	Свыше 20 человек	1	1,7

Примечание: данные получены путем прямого подсчета ответов респондентов. Статистическая значимость различий между группами педагогов по регионам проверена критерием χ^2 Пирсона ($p > 0,05$), что подтверждает однородность выборки.

Ранжирование мотивационных факторов выявило доминирующую роль материального стимулирования в удержании педагогических кадров: повышение заработной платы отметили 88,3% респондентов ($n = 53$), определив его как приоритетный фактор продолжения профессиональной деятельности в сельской местности. Улучшение материально-технических условий (61,7%, $n = 37$) и предоставление жилья (51,7%, $n = 31$) занимают второе и третье места в иерархии потребностей, отражая базовые дефициты инфраструктурного обеспечения.

Профессиональные намерения демонстрируют высокий риск кадрового оттока: только 56,7% педагогов выражают определенные или вероятные планы продолжения работы в текущей школе, тогда как 20,0% склоняются к смене места работы, а 23,3% находятся в состоянии профессиональной неопределенности. Критическим фактором является высокая мотивация к переходу в городские школы у 56,7% респондентов, что подтверждает системный кризис закрепления кадров в сельском образовании.

Необходима федеральная программа кадрового обеспечения сельских школ педагогами естественно-научных дисциплин, интегрирующая советский опыт с современной мотивацией.

Обязательная трехлетняя отработка для выпускников педвузов бюджетной формы через четырехсторонний договор (студент — университет — орган управления — школа) с повышенной стипендией 15–18 тыс. рублей (в 2,5–3 раза выше базовой), компенсацией проживания и питания, оплачиваемой практикой 4 месяца с зарплатой 25–30 тыс. рублей.

Жилищное обеспечение: строительство малоэтажных комплексов (2–3 квартиры на 100 учащихся), служебные квартиры 54/36 кв. м с выкупом по 50% стоимости при отработке 10 лет, компенсация аренды 70%, беспроцентная ипотека на 20 лет с субсидированием 30% первоначального взноса после 3 лет работы.

Социальные гарантии: доплата 50% к окладу, сокращение педстажа для пенсии с 25 до 20 лет, первоочередное зачисление детей в дошкольные учреждения, транспортная компенсация до 50 тыс. руб/год, полная компенсация повышения квалификации, льготное медобслуживание.

Профессиональная поддержка: целевая подготовка через профориентацию в 9–11-х классах, льготное поступление в педвузы, специализированные педклассы, сетевое взаимодействие с педвузами, именные стипендии 25–30 тыс. рублей при обязательстве вернуться в регион.

Наставничество — закрепление опытного педагога за молодым специалистом на 2 года с доплатой 5000–7000 руб/месяц, индивидуальные планы, еженедельные консультации 2 часа, взаимопосещение уроков, участие в конкурсах.

Профразвитие через межмуниципальные методцентры из 5–7 школ с курсами 72–108 часов

дважды в год, выездные семинары, дистанционные формы, стажировки в городских школах 2–4 недели, профсообщества с ежемесячными встречами.

Финансирование при дефиците 45 142 педагога и сокращении до 10–15% за 5–7 лет: стипендии для 8000–9000 студентов — 1,44–1,62 млрд руб/год, доплаты для 75 891 работающего — 4,55 млрд рублей, жилищные субсидии для 60% — 2,73 млрд рублей, строительство 500 квартир — 1,5 млрд рублей, наставничество и повышение квалификации — 0,91 млрд рублей, соцльготы — 1,26 млрд рублей. Итого: 12,39 млрд руб/год.

Этапы: 2025–2026 гг. — нормативно-правовое обеспечение, принятие федерального закона, создание фонда служебного жилья; 2026–2028 гг. — пилот в 15 регионах с целевым приемом 1500–2000 мест, строительство жилья, создание региональных центров наставничества; 2028–2032 гг. — масштабирование на все субъекты РФ с увеличением приема до 8000–9000 мест, достижением укомплектованности 85–90%.

Выводы/Conclusions

Исследование выявило критический дефицит педагогов естественно-научных дисциплин в сельских школах: укомплектованность 62,7% (дефицит 45 142 специалистов), наиболее критическая ситуация по химии (52,8%) и физике (58,3%).

Возрастная диспропорция: 43,3% педагогов в предпенсионном и пенсионном возрасте, лишь 11,7% моложе 30 лет, средний возраст 49,2 года. Высокая профессиональная мобильность: только 30% планируют остаться в школе, 56,7% рассматривают переход в городские учреждения.

Демотивирующие факторы: зарплата на 24,1% ниже городской, неудовлетворительная материально-техническая база (51,7%), чрезмерная нагрузка сверх 18 ч. (80%), многопредметное преподавание двух и более дисциплин (85%).

Предлагается целевое распределение с обязательной 3-летней отработкой: стипендия 15–18 тыс. руб/месяц, оплачиваемая практика 25–30 тыс. руб/месяц, гарантированное трудоустройство.

Жилищное обеспечение включает служебные квартиры 54/36 кв. м с правом выкупа за 50% стоимости, компенсацию аренды 70%, беспроцентную ипотеку с господдержкой 30% первоначального взноса.

Финансовые стимулы: доплата 50% к окладу за сельскую местность, льготная пенсия через 20 лет вместо 25, транспортные компенсации до 50 тыс. руб/год.

Профессиональная поддержка: обязательное наставничество с доплатой 5000–7000 руб/месяц, повышение квалификации на базе школ дважды в год, льготное поступление в педвузы для выпускников сельских школ.

Финансирование программы составит 12,4 млрд рублей ежегодно с ожидаемым повышением укомплектованности до 85–90% за 5–7 лет.

Этапы реализации: 2025–2026 гг. — принятие нормативной базы и создание федерального фонда служебного жилья, 2026–2028 гг. — пилотная реализация в 15 регионах с целевым приемом

1500–2000 мест, 2028–2032 гг. — масштабирование на всю РФ с увеличением целевого приема до 8000–9000 мест и достижением целевых показателей.

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 в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований» по теме «Ресурсно-прогностическая детерминация личностного и профессионального развития учащихся и педагогов как субъектов непрерывного образования: психологические основы, технологии, факторы эффективности» № FNRE-2024-0017. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», регистрационный № 121121600197-3.

FUNDING

This research was conducted as part of a state assignment to the Federal Scientific Center for Psychological and Interdisciplinary Research on the topic of "Resource-based and prognostic determination of the personal and professional development of students and teachers as subjects of continuous education: psychological foundations, technologies, and effectiveness factors" No. FNRE-2024-0017). This research was conducted as part of a state assignment to the Lomonosov Moscow State University, registration No. 121121600197-3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Popovych I., Semenov O., Semenova N., Zavatska N., Kovalchuk Z., Zavatskiy Y. Research of readiness of teachers of rural secondary schools for innovations. *Amazonia Investiga*. 2022; 11(54): 84–93. <https://doi.org/10.34069/AI/2022.54.06.9>
2. Сартакова Е.Е., Окушова Г.А., Еретнова Е.П. Сельская школа в условиях социокультурной модернизации образования: постнеклассические основания для концептуализации. *Вестник Томского государственного университета*. 2022; 481: 206–214. <https://doi.org/10.17223/15617793/481/23>
3. Новиков В.Г., Шестопалова Е.В., Можаяев Е.Е. Основные тренды развития дополнительного профессионального образования АПК в условиях цифровизации. *Экономика сельского хозяйства России*. 2022; (7): 32–39. <https://doi.org/10.32651/227-32>
4. Шерайзина Р.М., Александрова М.В., Ефлова З.Б. Сельская школа и сельский учитель: продуктивные российские и зарубежные практики. *Вестник Томского государственного университета*. 2021; 466: 190–201. <https://doi.org/10.17223/15617793/466/23>
5. Трубилин А.И., Петух А.В., Гайдук В.И. Ключевые элементы подготовки специалистов для развития АПК и сельских территорий: взаимосвязь образования, науки и бизнеса. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024; 114: 411–415. <https://elibrary.ru/kgkuco>
6. Topuzov O.M., Grynova M.V., Barbinova A.V., Kharchenko O.V., Kononets N.V. The model of professional development of natural science teachers of rural schools in the conditions of distance educational process. *Information Technologies and Learning Tools*. 2021; 85(5): 344–359. <https://doi.org/10.33407/itlt.v85i5.4601>
7. Гумерова Ф.Ф., Амирова Л.А., Калимуллина Г.И., Мустаев А.Ф., Гумерова О.В. Определение условий повышения качества образования в сельских школах с низкими образовательными результатами. *Science for Education Today*. 2023; 13(1): 85–107. <https://doi.org/10.15293/2658-6762.2301.05>
8. Субаева А.К., Авхадиев Ф.Н. Подготовка кадров для сельского хозяйства в условиях цифровой экономики. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021; 16(2): 133–137. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-133-137>
9. Lemesko T., Fomina T., Ostapchuk T., Tsarapkina Yu., Ivashova O. Contemporary topics of life long agrarian education under digital innovation conditions. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2647: 30053. <https://doi.org/10.1063/5.0104924>
10. Любимов А.П., Можаяев Е.Е., Закабунина Е.Н., Ушаков О.В. Кадровое обеспечение и устойчивое развитие агросферы России: проблемы, тенденции, перспективы. *АПК: экономика, управление*. 2022; (9): 28–41. <https://doi.org/10.33305/229-28>
11. Федоров В.А., Кубрушко П.Ф., Дубицкий В.В., Феоктистов А.В. Профессионально-педагогическое образование в России на современном этапе: концептуальный аспект. *Образование и наука*. 2022; 24(7): 11–44. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2022-7-11-44>
12. Kolomiets O., Litvinova T., Akyeva N., Kareva E., Kondakchian N. Influence of the quality of education on social and labour relations in the country. *Economic Annals — XXI*. 2021; 189(5–6-1): 79–89. <https://doi.org/10.21003/ea.V189-08>

REFERENCES

1. Popovych I., Semenov O., Semenova N., Zavatska N., Kovalchuk Z., Zavatskiy Y. Research of readiness of teachers of rural secondary schools for innovations. *Amazonia Investiga*. 2022; 11(54): 84–93. <https://doi.org/10.34069/AI/2022.54.06.9>
2. Sartakova E.E., Okushova G.A., Eretnova E.P. Rural school in the sociocultural modernization of education: Post-classical grounds for conceptualization. *Tomsk State University Journal*. 2022; 481: 206–214 (in Russian). <https://doi.org/10.17223/15617793/481/23>
3. Novikov V.G., Shestopalova E.V., Mozhaev E.E. Main trends in the development of additional vocational education in the agro-industrial complex in the context of digitalization. *Economics of Agriculture of Russia*. 2022; (7): 32–39 (in Russian). <https://doi.org/10.32651/227-32>
4. Sherayzina R.M., Alexandrova M.V., Efilova Z.B. The Rural School and the Rural Teacher: Productive Russian and International Practices. *Tomsk State University Journal*. 2021; 466: 190–201 (in Russian). <https://doi.org/10.17223/15617793/466/23>
5. Trubilin A.I., Petukh A.V., Gayduk V.I. Key elements of training specialists for the development of the Agricultural-Industrial Complex and rural areas: the interrelationship of education, science and business. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024; 114: 411–415 (in Russian). <https://elibrary.ru/kgkuco>
6. Topuzov O.M., Grynova M.V., Barbinova A.V., Kharchenko O.V., Kononets N.V. The model of professional development of natural science teachers of rural schools in the conditions of distance educational process. *Information Technologies and Learning Tools*. 2021; 85(5): 344–359. <https://doi.org/10.33407/itlt.v85i5.4601>
7. Gumerova F.F., Amirova L.A., Kalimullina G.I., Mustaev A.F., Gumerova O.V. Determining conditions for improving the quality of education in rural schools with low educational outcomes. *Science for Education Today*. 2023; 13(1): 85–107 (in Russian). <https://doi.org/10.15293/2658-6762.2301.05>
8. Subaeva A.K., Avkhadiyev F.N. Training of personnel for agriculture in the digital economy. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2021; 16(2): 133–137 (in Russian). <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-133-137>
9. Lemesko T., Fomina T., Ostapchuk T., Tsarapkina Yu., Ivashova O. Contemporary topics of life long agrarian education under digital innovation conditions. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2647: 30053. <https://doi.org/10.1063/5.0104924>
10. Liubimov A.P., Mozhaev E.E., Zakabunina E.N., Ushakov O.V. Staffing and sustainable development of the Russian agricultural sphere: problems, trends, prospects. *AIC: Economics, Management*. 2022; (9): 28–41 (in Russian). <https://doi.org/10.33305/229-28>
11. Fedorov B.A., Kubrushko P.F., Dubitsky V.V., Feoktistov A.V. Vocational teacher training in Russia at the present stage: Conceptual aspect. *The Education and science journal*. 2022; 24(7): 11–44 (in Russian). <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2022-7-11-44>
12. Kolomiets O., Litvinova T., Akyeva N., Kareva E., Kondakchian N. Influence of the quality of education on social and labour relations in the country. *Economic Annals — XXI*. 2021; 189(5–6-1): 79–89. <https://doi.org/10.21003/ea.V189-08>

13. Saitbaeva E.R., Ganaeva E.A., Muratova A.A. Management approaches to solving the problem of personnel shortage in the education system. *Перспективы науки и образования*. 2022; (6): 737–757. <https://elibrary.ru/flickgm>

14. Кузьмич Н.П. Укрепление кадрового обеспечения сельскохозяйственных организаций в целях развития сельских территорий. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2025; 5(123): 188–195. <https://doi.org/10.33938/255-188>

15. Шарипов С.А., Харисов Г.А. Роль кадрового обеспечения в организации эффективного аграрного сектора экономики региона. *Экономика сельского хозяйства России*. 2025; (2): 74–80. <https://doi.org/10.32651/252-74>

16. Кубрушко П.Ф., Шингарева М.В., Атапина Ю.А. Подготовка кадров для агропромышленного комплекса в системе непрерывного профессионального образования. *Агроинженерия*. 2022; 24(4): 58–63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>

17. Курмакаева Т.В., Ребезов М.Б., Колесниченко И.С. Взаимодействие науки, образования и бизнеса при подготовке кадров в системе ДПО. *Государственно-частное партнерство в сфере АПК: приоритетные направления и механизмы реализации. Материалы Международной научно-практической конференции*. М.: ООО «Угрешская типография». 2017; 123–125. <https://elibrary.ru/xmnyjt>

18. Зинченко Ю.П., Дорожкин Е.М., Зеер Э.Ф. Психолого-педагогические основания прогнозирования будущего профессионального образования: векторы развития. *Образование и наука*. 2020; 22(3): 11–35. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2020-3-11-35>

19. Долгова В.И., Пудеева Е.А., Чвякин В.А. Модель компетенций субъектов психолого-педагогического сопровождения профессионального самоопределения личности. *Перспективы науки и образования*. 2024; 6(72): 518–539. <https://doi.org/10.32744/pse.2024.6.32>

20. Артеменко Г.А. и др. Цифровая экономика и онлайн-образование: европейский опыт. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет. 2020; 351. ISBN 978-5-9296-1046-2 <https://elibrary.ru/ynuuvr>

21. Хлусова И.А. и др. Оценка уровня профессионального образования работников агропромышленного комплекса. *Фундаментальные исследования*. 2019; (5): 148–153. <https://elibrary.ru/jbokve>

13. Saitbaeva E.R., Ganaeva E.A., Muratova A.A. Management approaches to solving the problem of personnel shortage in the education system. *Perspectives of Science and Education*. 2022; (6): 737–757. <https://elibrary.ru/flickgm>

14. Kuzmich N.P. Strengthening the staffing of agricultural organizations for the development of rural areas. *Economy, Labor, Management in Agriculture*. 2025; 5(123): 188–195 (in Russian) <https://doi.org/10.33938/255-188>

15. Sharipov S.A., Kharisov G.A. The role of staffing in organizing an effective agricultural sector of the regional economy. *Economics of Agriculture of Russia*. 2025; (2): 74–80 (in Russian). <https://doi.org/10.32651/252-74>

16. Kubrushko P.F., Shingareva M.V., Atapina Yu.A. Agricultural staff training in the system of lifelong professional education. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022; 24(4): 58–63 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-58-63>

17. Kurmaeva T.V., Rebezov M.B., Kolesnichenko I.S. Interaction of science, education and business in training personnel in the system of additional professional education. *Public-private partnership in the sphere of agro-industrial complex: priority areas and implementation mechanisms. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Moscow: Ugreshskaya tipografiya. 2017; 123–125 (in Russian). <https://elibrary.ru/xmnyjt>

18. Zinchenko Yu.P., Dorozhkin E.M., Zeer E.F. Psychological and Pedagogical Bases for Determining the Future of Vocational Education: Vectors of Development. *The Education and science journal*. 2020; 22(3): 11–35 (in Russian). <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2020-3-11-35>

19. Dolgova V.I., Pudeeva E.A., Chvyakin V.A. Model of competencies of subjects of psychological and pedagogical support for professional self-determination of an individual. *Prospects of Science and Education*. 2024; 6(72): 518–539 (in Russian). <https://doi.org/10.32744/pse.2024.6.32>

20. Artemenko G.A. et al. Digital economy and online education: European experience. Stavropol: North Caucasus Federal University. 2020; 351 (in Russian). ISBN 978-5-9296-1046-2 <https://elibrary.ru/ynuuvr>

21. Khlusova I.A. et al. Assessment of the level of professional education of workers in the agro-industrial complex. *Fundamental research*. 2019; (5): 148–153 (in Russian). <https://elibrary.ru/jbokve>

ОБ АВТОРАХ

Людмила Александровна Паршутина¹

кандидат педагогических наук, заместитель директора, заведующая лабораторией психологических основ дидактики и методики преподавания parshutinala@mail.ru

Оксана Николаевна Рыжова²

кандидат педагогических наук, доцент oxana.ryzhova@mail.ru

¹Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, ул. Моховая, 9, стр. 4, Москва, 125009, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119234, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Lyudmila Alexandrovna Parshutina¹

Candidate of Pedagogical Sciences, Deputy Director, Head of the Laboratory of Psychological Foundations of Didactics and Teaching Methods parshutinala@mail.ru

Oksana Nikolaevna Ryzhova²

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor oxana.ryzhova@mail.ru

¹Federal Scientific Center for Psychological and Interdisciplinary Research, 9/4 Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russia

²Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia