

научно-теоретический и производственный журнал

АГРАРНАЯ НАУКА

AGRARIAN
SCIENCE

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

10
2025



БЕСПЛАТНО
скачать журнал
и подписаться



Подпишитесь
на наш
Telegram канал!



ВЕТЕРИНАРИЯ

Влияние таргетных комплексных пробиотиков на производственные показатели сельскохозяйственных

32

ЗООТЕХНИЯ

Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементным составом сыворотки крови коров красной степной породы

121

АГРОНОМИЯ

Влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя и озимой пшеницы

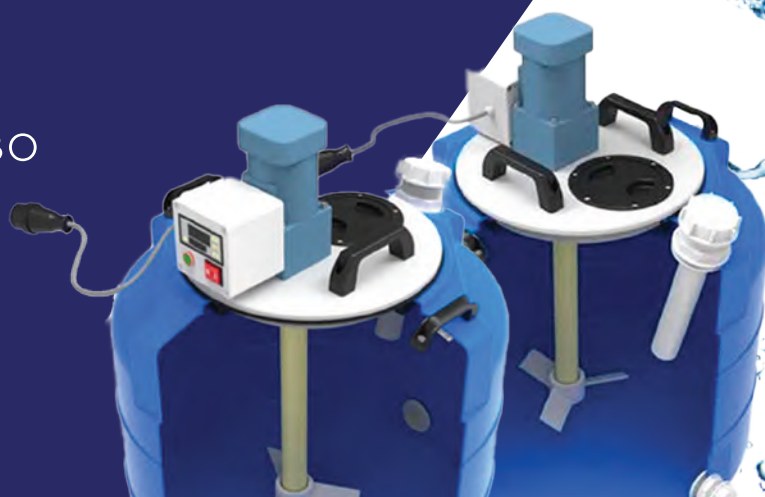
159

ИДЕАЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ В КАЖДОЙ КАПЛЕ



Ветеринарные миксеры для медикации
препаратов в птицеводстве и свиноводстве
от Группы компаний ВИК

- 💧 Полностью автоматизированный
цифровой миксер
- 💧 Гарантированное качество
дозировки препаратов
- 💧 Идеальное растворение
без осадка



Бак-Миксер Микс D-108
с блоком управления

Бак-Миксер Микс D-107
с питающим кабелем



Рекомендуется совместное
использование миксеров с дозаторами
Mixtron или ВЕТПРОФИ

10 · 2025

Agrarnaya nauka

Том 399, номер 10, 2025

Volume 399, number 10, 2025

ISSN 0869-8155 (print)

ISSN 2686-701X (online)

© журнал «Аграрная наука»

© авторы

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



DOI журнала 10.32634/0869-8155

Журнал «Аграрная наука» решением ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора 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://agrnayanauka.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://agrnayanauka.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 14.10.2025

Дата выхода в свет 21.10.2025

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. Горбатова 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.

Коцаев 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.

Баймуханов 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.

Лунева 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 мясомолочной продукции, г. Волгоград, Россия.

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

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

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

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

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.

Рамзанов 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.

10 · 2025

Agrarnaya nauka

Том 399, номер 10, 2025

Volume 399, number 10, 2025

ISSN 0869-8155 (print)

ISSN 2686-701X (online)

© journal «Agrarian science»

© authors

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



DOI журнала 10.32634/0869-8155

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

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

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

Founder: Limited liability company “VIC Animal Health”

Senior editor Kostromicheva I.V.

Executive editor Dolgaya M.N.

Design and layout Antonov S.N.

Editor-proofreader Kuznetsova G.M.

Bibliographer Neroznik D.S.

Journalist Sedova Yu.G.

Account Manager Teplova A.S.

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

Postal address: 109147, Russian Federation, Moscow, 3 Marxistskaya 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 14.10.2025

Release date 21.10.2025

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

АГРАРНАЯ НАУКА AGRARIAN SCIENCE

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

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

Publisher:

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief

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

THE EDITORIAL BOARD

ZOOTECHNICS AND VETERINARY MEDICINE

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

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

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

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

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

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

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, Zhangir 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.

16+

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. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

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

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

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. Gorbатов Federal Scientific Center for Food Systems Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

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

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

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

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

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

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

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

EDITORIAL AND EXPERT COUNCIL:

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

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

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

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

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

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

ВЕТЕРИНАРИЯ

Мифтахутдинов А.В., Ноговицина Е.А., Акентьева Е.В., Шакирова Ю.С. Изучение отдельных морфометрических особенностей стенки тонкой кишки у цыплят-бройлеров в условиях технологических стрессов в промышленном птицеводстве и на фоне их фармакологической профилактики	8
Яруллин А.И., Мухаммадиев Ришат С., Мухаммадиев Ринат С., Каримуллина И.Г., Сорокина Д.А., Гумеров В.Г. Разработка способа получения антигена аденовируса первой подгруппы аденовирусной инфекции крупного рогатого скота	17
Чуев Н.А. Применение фонофореза и ранозаживляющей повязки на основе коллаген-хитозанового комплекса «Коллахит-ФА» при лечении поверхностных ран у кроликов	25
Севастьянова Т.В., Уша Б.В., Носков С.Б., Альшевская А.А. Эффективность влияния таргетных комплексных пробиотиков на производственные показатели сельскохозяйственных животных	32
Устименко А.В., Абилов А.И., Козменков П.Л. Послеотельные отклонения у коров и первотелок и способы их коррекции	45
Фомина А.С., Васильев П.В., Крикунова А.А., Ермаков А.М. Современные методы и средства оценки проблемного поведения собак-компаньонов: аналитический обзор	58

ЗООТЕХНИЯ

Абдурасулов А.Х., Каландаров М.А., Ребезов М.Б., Косилов В.И. Живая масса и особенности телосложения овец породы ала-тоо	71
Йылдырым Е.А., Ильина Л.А., Лаптев Г.Ю., Филиппова В.А., Тюрина Д.Г., Соколова К.А., Заикин В.А., Пономарева Е.С., Фисинин В.И., Егоров И.А., Егорова Т.А., Манукян В.А., Ленкова Т.Н., Дегтярева О.Н., Тишенкова М.С., Демидова Е.С., Кашпоров Л.М., Пащенко В.Е. L-карнитин-индуцированные изменения в профиле экспрессии ключевых генов у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» с учетом половых различий	81
Гречкина В.В., Кван О.В., Шейда Е.В., Десятков М.А., Соболева Н.В. Эндогенные потери минеральных веществ в организме животных и факторы, влияющие на их доступность (обзор)	91
Денискова Т.Е. Идентификация QTL, локализованных в регионах гомозиготности у пород овец, разводимых в России	102
Белоус А.А., Харзинова В.Р., Чурбакова Н.А., Зиновьева Н.А. Генетическая изоляция и идентичность свиней коммерческих пород и мангалицы	110
Тарасова Е.И., Сизова Е.А., Яушева Е.В., Лебедев С.В. Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементарным составом сыворотки крови коров красной степной породы	121
Недашковский И.С., Сермягин А.А., Нарышкина Е.Н., Абдельманова А.С., Зиновьева Н.А. Сравнительный популяционно-генетический анализ генофондной красной горбатовской породы на основе SNP-маркеров	133
Дысин А.П., Баркова О.Ю. Молекулярно-генетические и эпигенетические механизмы регуляции мясной продуктивности у кур: современные данные об эпигенетических, метаболических и породных особенностях	142

АГРОНОМИЯ

Рябцева Н.А. Влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя и озимой пшеницы	159
Конonenko О.С., Шишкин Н.В., Дорошенко Е.С. Оценка резистентности сортов озимой мягкой пшеницы к <i>Puccinia triticina</i> в условиях Нижнего Дона	167

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Владимиров Ф.Е., Хакимов А.Р., Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Базаев С.О. Мониторинг pH и руминации для оптимизации кормления молочных коров: сравнительный анализ болюсов и ошейников с акселерометрами	174
Ржепаковский И.В., Писков С.И., Аванесян С.С., Сизоненко М.Н., Поветкин С.Н., Тимченко Л.Д., Шахбанов М.Ш., Нагдалян А.А., Ребезов М.Б. Влияние различных методов сушки на некоторые физико-химические свойства и антиоксидантную активность гидролизата белков куриного эмбриона	182

ЦИФРОВИЗАЦИЯ

Паршутин Л.А., Юрчук О.Л., Гайдамашко И.В. Научно-методическая и психологическая поддержка молодого учителя сельской школы в процессе цифровой трансформации	191
Введенская А.В., Глубокова М.Н. Цифровой двойник и предиктивное управление синтезом диизопропилового эфира в виброожиженном слое	197

CONTENTS

VETERINARY MEDICINE

<i>Miftakhutdinov A.V., Nogovitsina E.A., Akentieva E.V., Shakirova J.S.</i> Study of individual morphometric features of the small intestine wall in broiler chickens under conditions of technological stress in industrial poultry farming and against the background of their pharmacological prevention	8
<i>Yarullin A.I., Mukhammadiev Rishat S., Mukhammadiev Rinat S., Karimullina I.G., Sorokina D.A., Gumerov V.G.</i> Development of a method for obtaining bovine adenovirus subgroup 1 antigen	17
<i>Chuev N.A.</i> The use of phonophoresis and wound healing dressing based on collagen chitosan complex "Collachit-FA" in the treatment of superficial wounds in rabbits	25
<i>Sevastyanova T.V., Usha B.V., Noskov S.B., Alshevskaya A.A.</i> The effectiveness of targeted complex probiotics in improving the performance of farm animals	32
<i>Ustimenko A.V., Abilov A.I., Kozmenkov P.L.</i> Postpartum deviations in cows and first-calf heifers and methods for their correction	45
<i>Fomina A.S., Vasiliev P.V., Krikunova A.A., Ermakov A.M.</i> Modern methods and tools for assessing the problematic behavior of companion dogs: an analytical review	58

ZOOTECHNICS

<i>Abdurasulov A.Kh., Kalandarov M.A., Rebezov M.B., Kosilov V.I.</i> Live weight and body features of Ala-Too sheep	71
<i>Yildirim E.A., Ilina L.A., Laptev G.Yu., Filippova V.A., Tyurina D.G., Sokolova K.A., Zaikin V.A., Ponomareva E.S., Fisinin V.I., Egorov I.A., Egorova T.A., Manukyan V.A., Lenkova T.N., Degtyareva O.N., Tishenkova M.S., Demidova E.S., Kashporov L.M., Pashchenko V.E.</i> L-carnitine-induced changes in the expression profile of key genes in broiler chickens of the "Smena 9" cross, taking into account sex differences	81
<i>Grechkina V.V., Kvan O.V., Sheida E.V., Desyatkov M.A., Soboleva N.V.</i> New principles of optimizing the nutrition of farm animals based on selective management of endogenous losses of essential elements (review)	91
<i>Deniskova T.E.</i> Identification of QTL localized in the runs of homozygosity in sheep breeds raised in Russia	102
<i>Belous A.A., Kharzinova V.R., Churbakova N.A., Zinovieva N.A.</i> Genetic isolation and identity in pigs of Russian and foreign populations	110
<i>Tarasova E.I., Sizova E.A., Yausheva E.V., Lebedev S.V.</i> Association of the rs8193046 polymorphism of the TLR4 gene with the elemental composition of the blood serum of red steppe cows	121
<i>Nedashkovsky I.S., Sermyagin A.A., Naryshkina E.N., Abdelmanova A.S., Zinovieva N.A.</i> Comparative population-genetic analysis of the gene pool of the Red Gorbato breed based on SNP markers	133
<i>Dysin A.P., Barkova O.Yu.</i> Molecular genetic and epigenetic mechanisms of regulation of meat productivity in chickens: recent findings on epigenetic, metabolic and breed features	142

AGRONOMY

<i>Ryabtseva N.A.</i> The influence of biological growth regulators on the productivity of agrocenoses of spring barley and winter wheat	159
<i>Kononenko O.S., Shishkin N.V., Doroshenko E.S.</i> Estimation of winter common wheat varieties' resistance to Puccinia triticina in the Lower Don	167

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Vladimirov F.E., Khakimov A.R., Yurochka S.S., Pavkin D.Yu., Bazaev S.O.</i> Comparison of boluses and collars with accelerometers for monitoring the activity of dairy cows	174
<i>Rzhepakovsky I.V., Piskov S. I., Avanesyan S.S., Sizonenko M.N., Povetkin S.N., Timchenko L.D., Shakhbanov M.Sh., Nagdalian A.A., Rebezov M.B.</i> Effect of different drying methods on some physicochemical properties and antioxidant activity of chicken embryo protein hydrolysate	182

DIGITALIZATION

<i>Parshutina L.A., Yurchuk O.L., Gaidamashko I.V.</i> Scientific-methodological and psychological support for the young rural school teacher in the process of digital transformation	191
<i>Vvedenskaya A.V., Glubokova M.N.</i> Digital twin and predictive control of diisopropyl ether synthesis in a vibrofluidized bed	197

УДК 619:616.34-084.2/.3-091-092.19

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-8-16

А.В. Мифтахутдинов ✉

Е.А. Ноговицина

Е.В. Акентьева

Ю.С. Шакирова

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия

✉ nirugavm@mail.ru

Поступила в редакцию: 30.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Мифтахутдинов А.В., Ноговицина Е.А., Акентьева Е.В., Шакирова Ю.С.

Изучение отдельных морфометрических особенностей стенки тонкой кишки у цыплят-бройлеров в условиях технологических стрессов в промышленном птицеводстве и на фоне их фармакологической профилактики

РЕЗЮМЕ

В работе приведены данные морфометрических исследований структур стенки тонкой кишки цыплят-бройлеров, особенно слоев ее слизистой оболочки в условиях действия стрессоров, а также на фоне фармакологической его профилактики фармакологическим средством «Пик-антистресс». Первая группа (контрольная) получала полнорационный комбикорм, вторая (1-я опытная) — полнорационный комбикорм, включающий антистрессовую кормовую добавку «Пик-антистресс» в дозе 1,27 кг на 1 т корма за 5 суток до убоя, третья (2-я опытная) — кормовую добавку «Пик-антистресс» с включением в состав L-карнитина в общей дозе 1,7 кг на 1 т корма за 5 суток до убоя. При непродолжительном действии технологических стрессов на организм экспериментальной птицы наблюдали уменьшение морфометрических показателей стенки тонкой кишки, сопровождающееся уменьшением толщины слизистой оболочки, величины (высоты и ширины) ворсинок. Под влиянием фармакологической профилактики — кормовой добавки «Пик-антистресс» — и в сочетании с L-карнитином в опытных группах отмечали увеличение толщины оболочек стенки тонкой кишки, особенно слизистой и мышечной, что дает синергетический эффект, L-карнитин потенцирует действие фармакологических субстанций, включенных в состав средства «Пик-антистресс». Под действием антистрессовой терапии происходит значительное увеличение слизистой оболочки, особенно двенадцатиперстной кишки и тощей кишки за счет увеличения высоты ворсинок и уменьшения диаметра крипт и высоты эпителия.

Ключевые слова: стресс, цыплята-бройлеры, морфометрия, тонкая кишка, кормовая добавка «Пик-антистресс», L-карнитин

Для цитирования: Мифтахутдинов А.В., Ноговицина Е.А., Акентьева Е.В., Шакирова Ю.С. Изучение отдельных морфометрических особенностей стенки тонкой кишки у цыплят-бройлеров в условиях технологических стрессов в промышленном птицеводстве и на фоне их фармакологической профилактики. *Аграрная наука*. 2025; 399 (10): 8–16.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-8-16>

Study of individual morphometric features of the small intestine wall in broiler chickens under conditions of technological stress in industrial poultry farming and against the background of their pharmacological prevention

ABSTRACT

The paper presents data from morphometric studies of the structures of the wall of the small intestine of broiler chickens, especially the layers of its mucous membrane under the influence of stressors, as well as against the background of pharmacological prophylaxis with the pharmacological agent "Peak-antistress". The first group (control) received complete compound feed, the second (1st experimental) received complete compound feed, including the anti-stress feed additive "Peak-antistress" at a dose of 1.27 kg per 1 ton of feed 5 days before slaughter, the third (2nd experimental) received the feed additive "Peak-antistress" with the inclusion of It contains L-carnitine in a total dose of 1.7 kg per 1 ton of feed 5 days before slaughter. Under the short-term effect of technological stresses on the body of the experimental bird, a change in the morphometric parameters of the small intestine wall was observed, accompanied by a decrease in the thickness of the mucous membrane, the size (height and width) of the villi. Under the influence of pharmacological prophylaxis — the feed additive "Peak-antistress" — and in combination with L-carnitine in the experimental groups, an increase in the thickness of the membranes of the wall of the small intestine, especially mucosa and muscle, was noted, which gives a synergistic effect, L-carnitine potentiates the action of pharmaceutical substances included in the composition of the drug "Peak-antistress". Under the influence of anti-stress therapy, a significant increase in the mucous membrane occurs, especially the duodenum and jejunum due to an increase in the height of the villi and a decrease in the diameter of the crypts and the height of the epithelium.

Key words: stress, broiler chickens, morphometry, small intestine, feed additive "PIK-antistress", L-carnitine

For citation: Miftakhutdinov A.V., Nogovitsina E.A., Akentieva E.V., Shakirova J.S. Study of individual morphometric features of the small intestine wall in broiler chickens under conditions of technological stress in industrial poultry farming and against the background of their pharmacological prevention. *Agrarian science*. 2025; 399 (10): 8–16 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-8-16>

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-8-16

Alevtin V. Miftakhutdinov ✉

Elena A. Nogovitsina

Elizaveta V. Akentieva

Julia S. Shakirova

South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

✉ nirugavm@mail.ru

Received by the editorial office: 30.07.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Miftakhutdinov A.V., Nogovitsina E.A., Akentieva E.V., Shakirova J.S.

Введение/Introduction

Динамика развития сельскохозяйственного производства непосредственно связана с состоянием здоровья животных, которое напрямую зависит от влияния на организм разнообразных технологических стрессоров: их природы, силы, продолжительности воздействия [1–3].

В условиях промышленного содержания птиц действие стрессоров неизбежно и отрицательно сказывается на общем состоянии, формировании иммунного ответа на различные генетически чужеродные агенты, снижает продуктивность [4–8]. Для корректировки потерь в промышленном птицеводстве важное значение имеют знания морфологии аппаратов органов и их систем¹, анализ которых, используя методы морфологического исследования (морфометрии, цитологии, гистологии), может показать патогенетическую картину процесса и своевременно провести профилактические и лечебные мероприятия [9–11].

Большинство авторов, которые изучали влияние стрессоров на организм животных, отмечают, что при их воздействии происходят изменения структуры и функции в системе желез внутренней секреции, аппарате органов пищеварения: печени, кишечнике [12, 13]. Кишечник, как известно, является важным пищеварительным и иммунным органом для птиц благодаря своим функциям (пищеварению, всасыванию и регулированию аппетита), которые обеспечиваются наличием постоянных структур, способствующих увеличению всасывающей поверхности эпителиального слоя слизистой оболочки кишечника [14, 15].

К сожалению, тонкая кишка у птиц чувствительна к действию стрессоров в условиях промышленного содержания, особенно к предубойному и тепловому стрессу [16]. Такие стрессы вызывают снижение продуктивности у цыплят, повреждение кишечника, сопровождающиеся энтеритом, нарушением пищеварения, всасывания и даже нарушением функции эпителиального барьера кишечника, что делает животных восприимчивыми к заболеваниям [17, 18].

Тонкая кишка, ее слизистая оболочка участвуют в регуляции адаптационных реакций, поэтому проведение гистологических, морфометрических исследований структур ее стенки, особенно слоев слизистой оболочки в условиях действия стрессоров, а также на фоне фармакологической профилактики стресса является актуальным [19–21].

Ранее частично описанные результаты этого исследования показывают, что в летний период у цыплят перед убоем развивается стресс, связанный с высокой температурой окружающей среды и высокой плотностью посадки в условиях клеточного содержания [22]. Птицы очень плохо приспособлены к высоким температурам. С экономической и биологической точки зрения наиболее

затратным является убой в летний период, так как, помимо неопределенности среды, у цыплят включаются механизмы адаптации к высоким температурам, зачастую на фоне низкого содержания кислорода и высокой влажности, а также на отдельных предприятиях отсутствие воды в период голодной выдержки и в период транспортировки цыплят [17].

Адаптационные процессы характеризуются повышением уровня соотношения гетерофилов к лимфоцитам крови в среднем в 2,8 раз, что позволяет диагностировать острую фазу развития стрессовой реакции. Применение фармакологических средств «Пик-антистресс» и «Пик-антистресс» в сочетании с L-карнитином позволяет снизить активность стресс-реализующих механизмов и повысить сохранность цыплят. Смертность цыплят за период выращивания в летний период на фоне развития теплового стресса в контрольной группе составила 10,85%, в группе, где за 5 суток до убоя цыплят включали в комбикорм антистрессовую кормовую добавку «Пикантистресс», — 7,65%, в группе, где в комбикорм включали «Пик-антистресс» с L-карнитином, — 6,27%. Европейский индекс продуктивности в контрольной группе составил 285 ед., с добавкой «Пик-антистресс» — 317 ед., в группе, где в комбикорм включали «Пик-антистресс» с L-карнитином, — 330 ед. [22], что указывает на высокую эффективность применяемых фармакологических средств и ставит вопрос о формировании представлений о механизмах действия и возможном побочном органоспецифическом действии разработанного фармакологического средства.

Цель данной работы — изучение отдельных морфометрических особенностей стенки тонкой кишки у цыплят-бройлеров в условиях технологических стрессов в промышленном птицеводстве и на фоне их фармакологической профилактики.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В текущем исследовании из клинически здоровых цыплят кросса Ross 308 по принципу аналогов на промышленном птицеводческом предприятии в Челябинской области были сформированы в летний период 2024 года 3 группы по 95648 ± 931 голов в каждой.

Первая группа (контрольная) получала полноценный финишный комбикорм марки ПК-6 (ЗАО «СИТНО», Россия), который включает пшеницу, соевый шрот, подсолнечное масло, рыбную муку, дрожжи кормовые, а также аминокислоты (метионин, лизин), соль, премикс, монокальций-фосфат и другие витаминно-минеральные добавки, вторая группа (1-я опытная) получала аналогичный комбикорм, включающий антистрессовую

¹ Мифтахутдинов А.В. Изучение отдельных адаптационных морфологических закономерностей, влияющих на продуктивность кур и цыплят при развитии стрессов в промышленной среде. НИР: грант № 24-26-20039. Российский научный фонд. 2024.

кормовую добавку «Пик-антистресс» в дозе 1,27 кг на 1 т корма за 5 суток до убоя с кормом ежедневно, третья группа (2-я опытная) — кормовую добавку «Пик-антистресс» с включением в состав L-карнитина в общей дозе 1,7 кг на 1 т корма за 5 суток до убоя ежедневно с кормом. Кормовая добавка «Пик-антистресс» разработана в Южно-Уральском государственном аграрном университете и включает в себя янтарную кислоту, карбонат лития и соли других микроэлементов, аскорбиновую кислоту и глюкозу².

На 38-й день выращивания цыплят (непосредственно перед убоем) случайным образом из каждой группы отобраны по 10 голов, которые были умерщвлены методом декапитации и препарированы. Все исследования на птицах, включая убой, проведены с соблюдением биоэтических норм, соответствующих директиве № 2010/63/EU Европейского парламента о защите животных³.

Тонкая кишка была разделена на двенадцатиперстную, тощую и подвздошную, промыта дистиллированной водой, а затем 10%-ным раствором нейтрального формалина. В течение двух часов после убоя отобраны образцы размером 1 см и зафиксированы в 10%-ном растворе нейтрального формалина. С целью изготовления гистологических препаратов проведено обезживание образцов тканей с использованием этилового спирта возрастающей концентрации (70°, 80°, 90°, 96°, 100°), далее — уплотнение парафином и окрашивание с использованием основных красителей — гематоксилина и эозина.

Оценку гистологических структур, таких как толщина слизистой и мышечной оболочек, основной пластинки, диаметр крипт, высота эпителия, высота и ширина ворсинок, проводили на микроскопе «Микмед-6» (АО «Ломо», Россия) с цифровой цветной видеокамерой C-mex-5 Pro (Нидерланды).

Морфометрические измерения осуществляли в программе изображений ImageScope M (Aperio Technologies, США).

Результаты опыта были обработаны биометрически с использованием программы Statistica 12 (StatSoft, USA). Данные представлены в виде средних (M) и стандартного отклонения (S_D). Сравнительный межгрупповой анализ выполняли методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Уровень значимости был принят равным $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

При внешнем осмотре органов грудобрюшной полости у исследуемых групп птицы отмечено, что двенадцатиперстная, тощая и подвздошная кишки занимают нормальное положение, обычной

формы, не растянуты, серозная оболочка влажная, блестящая, серо-белого цвета, гладкая, без наложений и спаек, кровоизлияния отсутствуют. Органы содержат умеренное количество хилуса зеленоватого цвета и кашицеобразной консистенции с кислым запахом. Слизистая оболочка светло-розового цвета, не набухшая, без кровоизлияний, покрыта умеренным количеством сероватой слизи. При внешнем осмотре отличий между контрольной и опытными группами не обнаружено.

У исследуемых групп птицы внешних отличий в морфологическом строении стенки тонкой кишки не выявлено, микрокартина соответствует здоровым птицам без особенностей. Для более глубокого сопоставительного анализа проведены морфометрические исследования.

При проведении морфометрического анализа двенадцатиперстной кишки у экспериментальной птицы получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Морфометрические показатели стенки двенадцатиперстной кишки у цыплят-бройлеров ($M \pm SD$)

Table 1. Morphometric indicators of the duodenal wall in broiler chickens ($M \pm SD$)

Показатели	Контроль	Опыт 1-й	Опыт 2-й
Толщина слизистой оболочки, мкм	1531,84 ± 85,68	2262,49 ± 168,63	2043,88 ± 57,15
p1		0,0001	0,0001
p2		0,0007	
Толщина основной пластинки, мкм	54,84 ± 8,71	35,49 ± 6,87	37,88 ± 13,95
p1		0,0008	0,0029
p2		0,8627	
Высота ворсинок, мкм	330,70 ± 55,66	860,20 ± 94,82	774,80 ± 111,33
p1		0,0001	0,0001
p2		0,0813	
Ширина ворсинок, мкм	59,48 ± 23,91	72,37 ± 26,84	92,58 ± 21,57
p1		0,2717	0,004
p2		0,0799	
Диаметр крипт, мкм	62,67 ± 8,70	57,18 ± 7,16	58,08 ± 8,61
p1		0,3074	0,4333
p2		0,9673	
Высота эпителия в криптах, мкм	24,36 ± 2,28	28,73 ± 2,95	22,40 ± 3,64
p1		0,0086	0,3301
p2		0,0003	
Толщина мышечной оболочки, мкм	183,60 ± 17,76	222,90 ± 24,34	305,10 ± 30,09
p1		0,0038	0,0001
p2		0,0001	

Примечание: p1 — статистическая достоверность при сравнении обеих опытных групп с контрольной; p2 — статистическая достоверность при сравнении опытных групп между собой.

² Патент № 2701656 РФ, МПК A61D 99/00, A61P 25/18, A61P 39/06. Средство для повышения мясной продуктивности и качества мяса цыплят-бройлеров в условиях технологических стрессов.

³ Директива от 22.09.2010 № 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях.

Толщина слизистой оболочки двенадцатиперстной кишки значительно выше у цыплят опытной группы, максимальных значений достигает в 1-й опытной группе и составляет $2262,49 \pm 168,63$ мкм², что превышает показатель контрольной группы на 47,7%, во 2-й опытной группе этот показатель составляет $2043,88 \pm 57,15$ мкм², что выше контроля на 33,4%, в опытных группах разница статистически достоверна ($p = 0,0007$). Структуры слизистой оболочки, такие как толщина основной пластинки, диаметр крипт, в опытных группах имеют тенденцию к уменьшению относительно контрольной группы. Так, толщина основной пластинки уменьшается на 35,3% и 31,0% соответственно, диаметр крипт — на 8,7% и 7,3%. Высота эпителия в криптах максимальных значений достигает в 1-й опытной группе ($28,73 \pm 2,95$ мкм), во 2-й опытной группе — $22,40 \pm 3,64$ мкм, в контрольной — $24,36 \pm 2,28$ мкм. Ворсинки в двенадцатиперстной кишке экспериментальной птицы чаще встречаются листовидной и пальцевидной формы, а их величины (высота и длина) значительно изменяются. Так, в опытных группах по отношению к контролю высота увеличивается в 2,6 и 2,3 раза соответственно, а их ширина в 1,2 и 1,5 раза. Анализ толщины мышечной оболочки показал, что в опытных группах она превышает показатели контрольной на 21,4% и 66,2% соответственно, при этом наибольшей толщины мышечная оболочка достигала у цыплят 2-й опытной группы.

Можно отметить следующие закономерности: под действием антистрессовой терапии в предубойный период утолщение слизистой оболочки двенадцатиперстной кишки, снижение толщины основной пластинки, значительное повышение высоты ворсинок и толщины мышечной оболочки кишки, что указывает на то, что антистрессовая терапия в предубойный период приводит к комплексной морфофункциональной перестройке двенадцатиперстной кишки, что отражает снижение стресс-индуцированного повреждения, восстановление трофики и пролиферации клеток, оптимизацию пищеварительно-всасывающей функции кишечника. Наиболее значимым признаком, характеризующим действие изучаемых фармакологических средств, является увеличение высоты ворсинок, так как ворсинки двенадцатиперстной кишки ответственны за всасывание питательных веществ. Опираясь на имеющиеся литературные данные в области механизмов развития стрессов у птиц, можно предположить, что антистрессовая терапия привела к улучшению трофики энтероцитов благодаря нормализации кровотока и снижению катаболического действия кортикостерона и кортизола, активации клеточного обновления в криптах, снижению апоптоза энтероцитов, который усиливается при стрессе из-за окислительного повреждения и гипоксии [23–25].

Отличия в опытных группах обусловлены включением L-карнитина в состав фармакологического

средства «Пик-антистресс», что привело к снижению на 9,7% толщины слизистой оболочки двенадцатиперстной кишки, снижению высоты эпителия в криптах на 22,0% и повышению толщины мышечной оболочки кишки на 26,9%. Наблюдаемые морфологические закономерности предположительно связаны с тем, что L-карнитин играет ключевую роль в транспорте длинноцепочечных жирных кислот в митохондрии для β -окисления, что влияет на энергетический обмен клеток и приводит к ускорению клеточного обновления за счет стимуляции удаления стареющих или поврежденных энтероцитов за счет гиперплазии, вызванной стрессом. Другим механизмом может быть уменьшение отека слизистой оболочки кишки за счет улучшения микроциркуляции и снижения воспалительной инфильтрации, за счет антиоксидантных свойств L-карнитина [26, 27], подавляющих активность провоспалительных цитокинов. В то же время уменьшение избыточной пролиферации может указывать на нормализацию эпителиального гомеостаза, что приводит к снижению стресс-индуцированной гиперплазии и более физиологичному обновлению эпителия.

Повышение толщины мышечной оболочки видится за счет усиления сократительной способности гладкой мускулатуры за счет улучшения энергетического метаболизма, L-карнитин усиливает β -окисление жирных кислот, обеспечивая миоциты большим количеством АТФ, что способствует гипертрофии мышечных волокон [28–30].

Морфометрический анализ структур стенки тощей кишки показал следующие результаты (табл. 2).

Из таблицы 2 следует: общей тенденцией для обеих опытных групп является то, что толщина слизистой оболочки тощей кишки в опытных группах увеличивается в 1-й опытной на 113,8%, во 2-й — на 103,0%; высота ворсинок по отношению к контролю увеличивается в 1,7 и 2,03 раза соответственно, а их ширина — в 3,2 и 3,9 раза. Форма ворсинок в тощей кишке экспериментальной птицы чаще листовидной формы, а их высота и длина, как и в двенадцатиперстной кишке, значительно увеличиваются. Толщина основной пластинки, диаметр крипт в опытных группах по отношению к контрольной снижается на 15,6% и 35,6%, 7,2% и 15,1% соответственно. Высота эпителия максимальных значений достигает во 2-й опытной группе — $25,61 \pm 1,59$ мкм, в 1-й опытной группе — $20,95 \pm 3,49$ мкм, в контрольной группе — $22,59 \pm 4,36$ мкм.

Толщина мышечной оболочки в опытных группах имеет тенденцию к снижению относительно контрольной группы на 7,9% и 30,0%. Применение разработанного фармакологического средства «Пик-антистресс» приводит к значительному утолщению слизистой оболочки тощей кишки, что резко увеличивает ее всасывающую способность. Снижение толщины мышечной оболочки, возможно, связано с уменьшением стресс-индуцированного

Таблица 2. Морфометрические показатели стенки тощей кишки у цыплят-бройлеров ($M \pm SD$)

Table 2. Morphometric indicators of the jejunum wall in broiler chickens ($M \pm SD$)

Показатели	Контроль	Опытная 1-я	Опытная 2-я
Толщина слизистой оболочки, мкм	763,14 ± 42,97	1631,32 ± 71,05	1549,31 ± 147,77
p1		0,0001	0,0001
p2		0,1658	
Толщина основной пластинки, мкм	54,85 ± 9,92	46,27 ± 17,21	35,31 ± 7,75
p1		0,3099	0,0061
p2		0,1561	
Высота ворсинок, мкм	376,30 ± 42,27	627,60 ± 59,19	767,30 ± 52,17
p1		0,0001	0,0001
p2		0,0001	
Ширина ворсинок, мкм	29,44 ± 10,55	95,36 ± 30,29	114,06 ± 33,15
p1		0,0001	0,0001
p2		0,2044	
Диаметр крипт, мкм	56,34 ± 8,17	52,25 ± 4,69	47,84 ± 3,71
p1		0,2781	0,0084
p2		0,2286	
Высота эпителия в криптах, мкм	22,59 ± 4,36	20,95 ± 3,49	25,61 ± 1,59
p1		0,5271	0,1289
p2		0,0120	
Толщина мышечной оболочки, мкм	391,10 ± 23,91	360,00 ± 24,24	273,80 ± 3,64
p1		0,0404	0,0001
p2		0,0001	

Примечание: p1 — статистическая достоверность при сравнении обеих опытных групп с контрольной; p2 — статистическая достоверность при сравнении опытных групп между собой.

гипертонуса гладкой мускулатуры, вызванного симпатической активацией при развитии стресса.

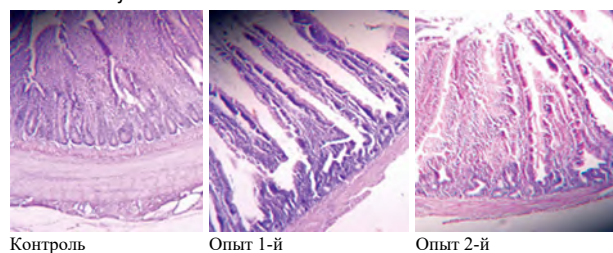
Использование группы L-карнитина перорально на фоне применения кормовой добавки «Пик-антистресс» оказало выраженное воздействие на увеличение высоты ворсинок, по сравнению с цыплятами 1-й опытной группы произошло увеличение высоты ворсинок на 18,2%, повышение высоты эпителия в криптах на аналогичное значение, снижение толщины мышечной оболочки тощей кишки на 23,9%, что может быть связано с тем, что L-карнитин усиливает действие белка IGF-1 за счет усиления экспрессии мРНК в печени и эпидермального фактора роста, это приводит к стимуляции роста ворсинок и улучшает регенерацию слизистой оболочки. Также он снижает уровень реактивных форм кислорода, защищая эпителий от повреждения и поддерживая его структурную целостность [26, 27, 31].

Отмеченное снижение толщины мышечной оболочки не связано с процессами атрофии, это четко прослеживается при анализе мышечной оболочки цыплят 2-й опытной группы и представлено на рисунке 1.

Наблюдается адаптивная перестройка, связанная с увеличением функциональной активности

Рис. 1. Стенка тощей кишки исследуемых цыплят-бройлеров. Гематоксилин-эозин x 50

Fig. 1. Jejunum wall in the studied broiler chickens. Hematoxylin-eosin x 50



Контроль

Опыт 1-й

Опыт 2-й

Таблица 3. Морфометрические показатели стенки подвздошной кишки у цыплят-бройлеров ($M \pm SD$)

Table 3. Morphometric indicators of the ileum wall in broiler chickens ($M \pm SD$)

Показатели	Контроль	Опыт 1-й	Опыт 2-й
Толщина слизистой оболочки, мкм	614,26 ± 19,89	824,40 ± 19,33	1127,62 ± 57,86
p1		0,001	0,001
p2		0,001	
Толщина основной пластинки, мкм	25,35 ± 5,65	25,80 ± 5,24	31,42 ± 7,35
p1		0,9854	0,0612
p2		0,0686	
Высота ворсинок, мкм	305,40 ± 29,12	312,30 ± 28,92	373,00 ± 20,99
p1		0,6015	< 0,001
p2		0,0001	
Ширина ворсинок, мкм	18,74 ± 6,40	32,74 ± 8,92	46,83 ± 11,86
p1		0,0008	0,0001
p2		0,0001	
Диаметр крипт, мкм	55,31 ± 10,71	59,62 ± 8,09	36,11 ± 2,82
p1		0,4538	0,0001
p2		0,0001	
Высота эпителия в криптах, мкм	29,34 ± 4,59	25,2 ± 3,83	17,66 ± 3,38
p1		0,0685	0,0001
p2		0,0008	
Толщина мышечной оболочки, мкм	223,20 ± 13,48	278,70 ± 21,65	583,60 ± 30,44
p1		0,0001	0,0001
p2		0,0001	

Примечание: p1 — статистическая достоверность при сравнении обеих опытных групп с контрольной; p2 — статистическая достоверность при сравнении опытных групп между собой.

тощего отдела кишечника, функционирующего при более оптимальном энергетическом снабжении за счет фармакологического действия L-карнитина. Различия между опытными группами указывают на дозозависимый или компонент-специфический эффект применяемых препаратов.

В таблице 3 представлены морфометрические показатели стенки подвздошной кишки у бройлеров.

Из таблицы 3 следует, что и в подвздошной кишке в 1-й и 2-й опытных группах по сравнению с контрольной отмечается более высокая

толщина слизистой оболочки на 29,1% и 58,9% соответственно, при этом толщина мышечной оболочки выше по сравнению с цыплятами контрольной группы — соответственно, на 22,1% и 89,3%. Толщина основной пластинки подвздошной кишки соответствует значениям в опытных и контрольной группах. Высота ворсинок в 1-й опытной группе соответствует значениям из контроля, а во 2-й — выше на 18,1%, при этом ширина ворсинок в обеих опытных группах превышает контроль в 1-й опытной группе на 42,8% и в 2,5 раза — во 2-й.

Ворсинки в подвздошной кишке экспериментальной птицы чаще пальцевидной формы, а их высота и ширина изменяются незначительно по сравнению с контролем и двенадцатиперстной и тощей кишками. Диаметр крипт в 1-й опытной группе соответствует значениям из контрольной группы, а во 2-й — снижается на 34,7%. Высота эпителия в криптах в 1-й опытной группе имеет тенденцию к снижению, а во 2-й — существенно ниже значений контрольной группы на 49,4%.

Закономерности, обнаруженные при анализе таблицы 3, подтверждают вышеописанные морфологические особенности и дополнительно доказывают, что антистрессовая терапия не просто нивелирует негативные эффекты предубойного стресса, но активно улучшает морфофункциональное состояние кишечника, что может иметь прямое влияние на продуктивность цыплят-бройлеров. В подвздошной кишке увеличение толщины слизистой оболочки идет более равномерно, диаметр крипт и высота эпителия превышают показатели контрольной группы, в отличие от морфометрических показателей двенадцатиперстной и тощей кишок, возможно, это связано с особенностями действия кормовой добавки, однако для полного понимания механизмов описанных процессов и их воспроизводимости требуется отдельное исследование.

Включение L-карнитина в состав антистрессовой терапии позволяет дополнительно усилить развитие слизистой оболочки тонкого кишечника, смещает процессы адаптации в сторону увеличения площади всасывания за счет увеличения ширины ворсинок, а не их высоты. Цинк, входящий в состав добавки, используется в рационах птицы из-за его антистрессового действия, так как его потребность возрастает, а содержание снижается во время стресса, он положительно влияет на усвоение корма, участвуя в метаболизме углеводов, липидов и белков, поддержании барьерной функции кишечника [32].

Дефицит L-карнитина может возникать у животных в состоянии стресса, его биологическая роль заключается в выполнении двух важных функций в метаболизме энергии: способствует выходу длинноцепочечных жирных кислот в митохондрии при процессах генерирования энергии и удалению из митохондрий короткоцепочечных и среднецепочечных жирных кислот, которые накапливаются в

результате нормального и аномального метаболизма [33].

Бетаин способствует поддержанию осмотического баланса в кишечнике и клетках в условиях стресса, предупреждает нарушения, вызванные осмотическим шоком в условиях высоких температур, снижает отрицательное действие кормовых стрессоров и микотоксинов [33].

Карбонат лития, содержащийся в составе добавки, влияет на баланс процессов возбуждения и торможения в центральной нервной системе птиц, не затрагивая нейрорецепторный аппарат мозга, и включается в регуляцию нейросинаптической активности благодаря ингибированию ферментов, ответственных за главный метаболический путь деградации гамма-аминомасляной кислоты. Ионы лития, поступающие с кормом и водой, способствуют поддержанию нормальной возбудимости ЦНС и тонуса кровеносных сосудов за счет снижения избыточной концентрации норадреналина в ЦНС и нормализации уровня ионов натрия в нервных и мышечных клетках [34].

Все перечисленные компоненты, входящие в состав фармакологического средства «Пик-антистресс», не обладают общетоксическими свойствами и не оказывают избирательного токсического действия на органы пищеварительной иммунной системы птиц [19, 33, 34].

Выводы/Conclusions

При непродолжительном действии технологических стрессов на организм экспериментальной птицы наблюдается изменение морфометрических показателей стенки тонкой кишки, сопровождающееся уменьшением толщины слизистой оболочки, величины (высоты и ширины) ворсинок. Под влиянием фармакологической профилактики (кормовой добавки «Пик-антистресс») и в сочетании с L-карнитином в опытных группах отмечается увеличение толщины оболочек стенки тонкой кишки, особенно слизистой и мышечной, что дает синергетический эффект, L-карнитин потенцирует действие фармацевтических субстанций, включенных в состав средства «Пик-антистресс».

Под действием антистрессовой терапии происходит значительное увеличение слизистой оболочки, особенно двенадцатиперстной и тощей кишок — на 33,4–47,7% и 103,0–113,8 % соответственно, за счет увеличения высоты ворсинок и уменьшения диаметра крипт и высоты эпителия. В связи с увеличением высоты ворсинок увеличивается и площадь всасывающей поверхности ворсинок, что может указывать на улучшение всасывания питательных веществ, функциональной активности тонкой кишки, что непосредственно связано с продуктивностью птицы и, согласно ранее проведенным исследованиям [14], подтверждается повышением европейского индекса продуктивности цыплят в среднем на 32–45 ед.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20039.
<https://rscf.ru/project/24-26-20039>

FUNDING

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 24-26-20039.
<https://rscf.ru/project/24-26-20039>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гласкович М.А. Стрессы в условиях интенсивного выращивания птицы. *Наше сельское хозяйство*. 2024; 2(322): 18–21.
<https://elibrary.ru/ruywoo>
2. Смирнова В.И. Рационализация системы содержания животных для снижения стрессовых факторов и повышения продуктивности. *Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства: Сборник статей X Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2025; 236–239.
<https://elibrary.ru/mniics>
3. Пергамент А.Д., Фалынскова Н.П. Влияние стресса на биохимические показатели крови у животных. *Современные научные тенденции в ветеринарии: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2025; 156–160.
<https://elibrary.ru/rcgicg>
4. Фисинин В.И., Кавтарашвили А.Ш. Тепловой стресс у птицы. Сообщение I. Опасность, физиологические изменения в организме, признаки и проявления (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2015; 50(2): 162–171.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.2.162rus>
5. Кавтарашвили А.Ш., Колокольникова Т.Н. Физиология и продуктивность птицы при стрессе (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2010; 45(4): 25–37.
<https://elibrary.ru/mukcuf>
6. Gorelik O.V. et al. Dynamics of Hematological Indicators of Chickens under Stress-Inducing Influence. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020; 10(2): 264–267.
<https://elibrary.ru/xvhtey>
7. 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://elibrary.ru/leezaj>
8. Харлап С.Ю., Лоретц О.Г., Горелик О.В., Ребезов М.Б., Максимюк Н.Н. Изменение лейкоцитарных индексов при оценке воздействия стресс-фактора. *Актуальные проблемы биотехнологии и ветеринарной медицины: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых*. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского. 2017; 419–429.
<https://elibrary.ru/xzgjkl>
9. Дроздова Л.И., Кундюкова У.И. Печень птицы — живая лаборатория оценки качества кормления и содержания. *Аграрный вестник Урала*. 2010; (5): 68–70.
<https://elibrary.ru/msxwtz>
10. Громов И.Н., Сафонов Д.Н., Левкина В.А., Сенченкова А.С. Роль гистологического исследования в диагностике вирусных респираторных и кишечных болезней птиц. *Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития: Материалы Международной научно-практической конференции*. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет. 2024; 10–16.
<https://doi.org/10.22450/978-5-9642-0629-3-10-16>
11. Громов И. Роль патоморфологического исследования в диагностике болезней органов пищеварения, обмена веществ и токсикозов птиц. *Ветеринарное дело (Минск)*. 2025; (2): 13–21.
<https://elibrary.ru/wijbqs>
12. Фисинин В.И., Коноплева А.П. О физиологических и морфологических процессах в организме птицы при естественной и принудительной линьке. *Сельскохозяйственная биология*. 2015; 50(6): 719–728.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.6.719rus>
13. He X. et al. Effects of chronic heat exposure on growth performance, intestinal epithelial histology, appetite-related hormones and genes expression in broilers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018; 98(12): 4471–4478.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.8971>
14. Awad W., Ghareeb K., Böhm J. Intestinal Structure and Function of Broiler Chickens on Diets Supplemented with a Synbiotic Containing *Enterococcus faecium* and Oligosaccharides. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008; 9(11): 2205–2216.
<https://doi.org/10.3390/ijms9112205>

REFERENCES

1. Glaskovich M.A. Stress in conditions of intensive poultry farming. *Nashe sel'skoye khozyaystvo*. 2024; 2(322): 18–21 (in Russian).
<https://elibrary.ru/ruywoo>
2. Smirnova V.I. Rationalization of the animal husbandry system to reduce stress factors and increase productivity. *Resource-saving technologies and technical means for the production of crop and livestock products: Collection of articles of the X International scientific and practical conference*. Penza: Penza State Agrarian University. 2025; 236–239 (in Russian).
<https://elibrary.ru/mniics>
3. Pergament A.D., Falynskova N.P. Influence of stress on biochemical indicators in animals. *Modern scientific trends in veterinary medicine: Collection of articles of the IV International scientific and practical conference*. Penza: Penza State Agrarian University. 2025; 156–160 (in Russian).
<https://elibrary.ru/rcgicg>
4. Fisinin V.I., Kavtarashvili A.Sh. Heat stress in poultry. I. Danger, related physiological changes and symptoms (review). *Agricultural Biology*. 2015; 50(2): 162–171 (in Russian).
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.2.162eng>
5. Kavtarashvili A.Sh., Kolokolnikova T.N. Physiology and productivity of poultry under stress (review). *Agricultural Biology*. 2010; 45(4): 25–37 (in Russian).
<https://elibrary.ru/mukcuf>
6. Gorelik O.V. et al. Dynamics of Hematological Indicators of Chickens under Stress-Inducing Influence. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020; 10(2): 264–267.
<https://elibrary.ru/xvhtey>
7. 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://elibrary.ru/leezaj>
8. Kharlap S.Yu., Lorets O.G., Gorelik O.V., Rebezov M.B., Maksimuk N.N. Changes in leukocyte indices when assessing the impact of a stress factor. *Actual problems of biotechnology and veterinary medicine: Proceedings of the International scientific and practical conference of young scientists*. Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky. 2017; 419–429 (in Russian).
<https://elibrary.ru/xzgjkl>
9. Drozdova L.I., Kundrykova U.I. Poultry liver — a living laboratory for assessing the quality of feeding and maintenance. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2010; (5): 68–70 (in Russian).
<https://elibrary.ru/msxwtz>
10. Gromov I.N., Safonov D.N., Levkina V.A., Senchenkova A.S. The role of histological examination in the diagnosis of avian viral respiratory and intestinal diseases. *Agro-industrial complex: problems and development prospects: Proceedings of the International scientific and practical conference*. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University. 2024; 10–16 (in Russian).
<https://doi.org/10.22450/978-5-9642-0629-3-10-16>
11. Gromov I. The role of pathomorphological research in the diagnosis of diseases of the digestive organs, metabolism and toxicosis of birds. *Veterinary business (Veterinarnoye delo (Minsk))*. 2025; (2): 13–21 (in Russian).
<https://elibrary.ru/wijbqs>
12. Fisinin V.I., Konopleva A.P. About physiological and morphological processes in poultry at natural and induced molting. *Agricultural Biology*. 2015; 50(6): 719–728 (in Russian).
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.6.719eng>
13. He X. et al. Effects of chronic heat exposure on growth performance, intestinal epithelial histology, appetite-related hormones and genes expression in broilers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018; 98(12): 4471–4478.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.8971>
14. Awad W., Ghareeb K., Böhm J. Intestinal Structure and Function of Broiler Chickens on Diets Supplemented with a Synbiotic Containing *Enterococcus faecium* and Oligosaccharides. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008; 9(11): 2205–2216.
<https://doi.org/10.3390/ijms9112205>

15. Yang P.-C., He S.-H., Zheng P.-Y. Investigation into the signal transduction pathway via which heat stress impairs intestinal epithelial barrier function. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*. 2007; 22(11): 1823–1831. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2006.04710.x>
16. Abdelqader A., Al-Fataftah A.-R. Thermal acclimation of broiler birds by intermittent heat exposure. *Journal of Thermal Biology*. 2014; 39: 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.11.001>
17. Mazzoni M., Zampiga M., Clavenzani P., Lattanzio G., Tagliavia C., Sirri F. Effect of chronic heat stress on gastrointestinal histology and expression of feed intake-regulatory hormones in broiler chickens. *Animal*. 2022; 16(8): 100600. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100600>
18. He X. *et al.* Effects of dietary taurine supplementation on growth performance, jejunal morphology, appetite-related hormones, and genes expression in broilers subjected to chronic heat stress. *Poultry Science*. 2019; 98(7): 2719–2728. <https://doi.org/10.3382/ps/pez054>
19. Фисинин В.И., Сайфульмулюков Э.Р., Мифтахутдинов А.В. Специализированные фармакологические препараты и кормовые добавки, применяемые в птицеводстве для профилактики технологических стрессов: стрессы различной этиологии. *Достижения науки и техники АПК*. 2023; 37(11): 75–90. <https://elibrary.ru/dwpmzv>
20. Фисинин В.И., Сайфульмулюков Э.Р., Мифтахутдинов А.В. Специализированные фармакологические препараты и кормовые добавки, применяемые в птицеводстве для профилактики технологических стрессов: тепловой стресс (обзор). *Достижения науки и техники АПК*. 2023; 37(4): 31–47. <https://elibrary.ru/ouvjlk>
21. Sahin K., Sahin N., Kucuk O., Hayirli A., Prasad A.S. Role of dietary zinc in heat-stressed poultry: A review. *Poultry Science*. 2009; 88(10): 2176–2183. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00560>
22. Мифтахутдинов А.В., Ноговицина Е.А., Лазарева М.П., Акентьева Е.В. Изучение отдельных адаптационных механизмов и морфологических закономерностей у цыплят-бройлеров на фоне фармакологической профилактики сочетанного предубойного, теплового и транспортного стрессов в промышленном птицеводстве. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024; (4): 53–60. <https://doi.org/10.31857/S2500262724040109>
23. Сурай П., Фисинин В.И. Современные методы борьбы со стрессами в птицеводстве: от антиоксидантов к витаминам. *Сельскохозяйственная биология*. 2012; 47(4): 3–13. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.4.3rus>
24. Gilani S., Chrystal P.V., Barekatin R. Current experimental models, assessment and dietary modulations of intestinal permeability in broiler chickens. *Animal Nutrition*. 2021; 7(3): 801–811. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.03.001>
25. Abdel Aziz A.A.M., Abdel Aziz E.-S.A., Khairy M.H., Fadel C., Giorgi M., Abdelaziz A.S. The effect of butyric acid and nucleotides supplementation on broiler (*Gallus gallus domesticus*) growth performance, immune status, intestinal histology, and serum parameters. *Open Veterinary Journal*. 2024; 14(1): 324–334. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i1.29>
26. Bahrampour H., Mohammadzadeh S., Amiri M. Impact of dietary L-carnitine supplementation on blood parameters and duodenal alterations in laying hens at the end of production. *Tissue and Cell*. 2024; 91: 102585. <https://doi.org/10.1016/j.tice.2024.102585>
27. Yousefi J., Taherpour K., Ghasemi H.A., Akbari Gharaei M., Mohammadi Y., Rostami F. Effects of emulsifier, betaine, and L-carnitine on growth performance, immune response, gut morphology, and nutrient digestibility in broiler chickens exposed to cyclic heat stress. *British Poultry Science*. 2023; 64(3): 384–397. <https://doi.org/10.1080/00071668.2022.2160626>
28. Lien T.-F., Horng Y.-M. The effect of supplementary dietary L-carnitine on the growth performance, serum components, carcass traits and enzyme activities in relation to fatty acid beta-oxidation of broiler chickens. *British Poultry Science*. 2001; 42(1): 92–95. <https://doi.org/10.1080/713655014>
29. Longo N., Frigeni M., Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Cell Research*. 2016; 1863(10): 2422–2435. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2016.01.023>
30. Choi J., Shakeri M., Bowker B., Zhuang H., Kong B. Differentially abundant proteins, metabolites, and lipid molecules in spaghetti meat compared to normal chicken breast meat: Multiomics analysis. *Poultry Science*. 2025; 104(7): 105165. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105165>
31. Fujimoto H., Matsumoto K., Koseki M., Yamashiro H., Yamada T., Takada R. Effects of rice feeding and carnitine addition on growth performance and mRNA expression of protein metabolism-related genes in broiler grower chicks. *Animal Science Journal*. 2020; 91(1): e13390. <https://doi.org/10.1111/asj.13390>
15. Yang P.-C., He S.-H., Zheng P.-Y. Investigation into the signal transduction pathway via which heat stress impairs intestinal epithelial barrier function. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*. 2007; 22(11): 1823–1831. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2006.04710.x>
16. Abdelqader A., Al-Fataftah A.-R. Thermal acclimation of broiler birds by intermittent heat exposure. *Journal of Thermal Biology*. 2014; 39: 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.11.001>
17. Mazzoni M., Zampiga M., Clavenzani P., Lattanzio G., Tagliavia C., Sirri F. Effect of chronic heat stress on gastrointestinal histology and expression of feed intake-regulatory hormones in broiler chickens. *Animal*. 2022; 16(8): 100600. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100600>
18. He X. *et al.* Effects of dietary taurine supplementation on growth performance, jejunal morphology, appetite-related hormones, and genes expression in broilers subjected to chronic heat stress. *Poultry Science*. 2019; 98(7): 2719–2728. <https://doi.org/10.3382/ps/pez054>
19. Fisinin V.I., Saifulmulyukov E.R., Miftakhutdinov A.V. Specialised pharmacological preparations and feed additives used in poultry farming to prevent technology stress: stress of various aetiologies (review). *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2023; 37(11): 75–90 (in Russian). <https://elibrary.ru/dwpmzv>
20. Fisinin V.I., Saifulmulyukov E.R., Miftakhutdinov A.V. Specialized pharmacological preparations and feed additives used in poultry farming for the prevention of technological stress: heat stress (review). *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2023; 37(4): 31–47 (in Russian). <https://elibrary.ru/ouvjlk>
21. Sahin K., Sahin N., Kucuk O., Hayirli A., Prasad A.S. Role of dietary zinc in heat-stressed poultry: A review. *Poultry Science*. 2009; 88(10): 2176–2183. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00560>
22. Miftakhutdinov A.V., Nogovitsina E.A., Lazareva M.P., Akentyeva E.V. Study of special adaptation mechanisms and morphological regularities of broiler chickens against the background of pharmacological prevention combined pre-slaughter, heat and transport stress in industrial poultry farming. *Russian Agricultural Sciences*. 2024; (4): 53–60 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2500262724040109>
23. Surai P., Fisinin V.I. The modern anti-stress technologies in poultry: from antioxidants to vitagenes. *Agricultural Biology*. 2012; 47(4): 3–13 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.4.3eng>
24. Gilani S., Chrystal P.V., Barekatin R. Current experimental models, assessment and dietary modulations of intestinal permeability in broiler chickens. *Animal Nutrition*. 2021; 7(3): 801–811. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.03.001>
25. Abdel Aziz A.A.M., Abdel Aziz E.-S.A., Khairy M.H., Fadel C., Giorgi M., Abdelaziz A.S. The effect of butyric acid and nucleotides supplementation on broiler (*Gallus gallus domesticus*) growth performance, immune status, intestinal histology, and serum parameters. *Open Veterinary Journal*. 2024; 14(1): 324–334. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i1.29>
26. Bahrampour H., Mohammadzadeh S., Amiri M. Impact of dietary L-carnitine supplementation on blood parameters and duodenal alterations in laying hens at the end of production. *Tissue and Cell*. 2024; 91: 102585. <https://doi.org/10.1016/j.tice.2024.102585>
27. Yousefi J., Taherpour K., Ghasemi H.A., Akbari Gharaei M., Mohammadi Y., Rostami F. Effects of emulsifier, betaine, and L-carnitine on growth performance, immune response, gut morphology, and nutrient digestibility in broiler chickens exposed to cyclic heat stress. *British Poultry Science*. 2023; 64(3): 384–397. <https://doi.org/10.1080/00071668.2022.2160626>
28. Lien T.-F., Horng Y.-M. The effect of supplementary dietary L-carnitine on the growth performance, serum components, carcass traits and enzyme activities in relation to fatty acid beta-oxidation of broiler chickens. *British Poultry Science*. 2001; 42(1): 92–95. <https://doi.org/10.1080/713655014>
29. Longo N., Frigeni M., Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Cell Research*. 2016; 1863(10): 2422–2435. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2016.01.023>
30. Choi J., Shakeri M., Bowker B., Zhuang H., Kong B. Differentially abundant proteins, metabolites, and lipid molecules in spaghetti meat compared to normal chicken breast meat: Multiomics analysis. *Poultry Science*. 2025; 104(7): 105165. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105165>
31. Fujimoto H., Matsumoto K., Koseki M., Yamashiro H., Yamada T., Takada R. Effects of rice feeding and carnitine addition on growth performance and mRNA expression of protein metabolism-related genes in broiler grower chicks. *Animal Science Journal*. 2020; 91(1): e13390. <https://doi.org/10.1111/asj.13390>

32. Pardo Z., Seiquer I. Supplemental Zinc exerts a positive effect against the heat stress damage in intestinal epithelial cells: Assays in a Caco-2 model. *Journal of Functional Foods*. 2021; 83: 104569. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104569>

33. Сабирзянова Л.И., Лунегов А.М., Коновалова Г.В., Токар В.В. L-карнитин: применение в животноводстве (обзор литературы). *Актуальные вопросы ветеринарной биологии*. 2023; (1): 25–31. <https://doi.org/10.24412/2074-5036-2023-1-25-31>

34. Остренко К.С., Галочкина В.П., Колоскова Е.М., Галочкин В.А. Органические соли лития — эффективные антистрессовые препараты нового поколения. *Проблемы биологии продуктивных животных*. 2017; (2): 5–28. <https://elibrary.ru/yrtwz>

ОБ АВТОРАХ

Алевтин Викторович Мифтахутдинов

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой морфологии, физиологии и фармакологии nirugavm@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8496-2810>

Елена Александровна Ноговицина

кандидат биологических наук, доцент кафедры морфологии, физиологии и фармакологии madzuga74@mail.ru

Елизавета Викторовна Акентьева

студент
akenteva02@mail.ru

Юлия Сабирьяновна Шакирова

студент
t.kmpt@sursau.ru

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

32. Pardo Z., Seiquer I. Supplemental Zinc exerts a positive effect against the heat stress damage in intestinal epithelial cells: Assays in a Caco-2 model. *Journal of Functional Foods*. 2021; 83: 104569. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104569>

33. Sabirzyanova L.I., Lunegov A.M., Konovalova G.V., Tokar V.V. L-carnitine: application in animal husbandry (literature review). *Actual questions of veterinary biology*. 2023; (1): 25–31 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2074-5036-2023-1-25-31>

34. Ostrenko K.S., Galochkina V.P., Koloskova E.M., Galochkin V.A. Organic lithium salt are effective anti-stress preparations of a new generation. *Problems of Productive Animal Biology*. 2017; (2): 5–28 (in Russian). <https://elibrary.ru/yrtwz>

ABOUT THE AUTHORS

Alevtin Viktorovich Miftakhutdinov

Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Morphology, Physiology and Pharmacology nirugavm@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8496-2810>

Elena Aleksandrovna Nogovitsina

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Morphology, Physiology and Pharmacology madzuga74@mail.ru

Elizaveta Viktorovna Akentieva

Student
akenteva02@mail.ru

Yulia Sabiryanovna Shakirova

Student
t.kmpt@sursau.ru

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



AGROCON

Найди себя в АГРО

Крупнейшая межуниверситетская
выставка-форум АПК для
молодёжи



agrocon.pro

17 ОКТЯБРЯ | ул. МИКЛУХО-МАКЛАЯ, Д.6
РУДН

Реклама

УДК 578.826.2

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-17-24

А.И. Яруллин

Ришат С. Мухаммадиев ✉

Ринат С. Мухаммадиев

И.Г. Каримуллина

Д.А. Сорокина

В.Г. Гумеров

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

✉ tashir9891@mail.ru

Поступила в редакцию: 01.05.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Яруллин А.И., Мухаммадиев Ришат С.,
Мухаммадиев Ринат С., Каримуллина И.Г.,
Сорокина Д.А., Гумеров В.Г.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-17-24

Ainur I. Yarullin

Rishat S. Mukhammadiev ✉

Rinat S. Mukhammadiev

Ilsiyar G. Karimullina

Diana A. Sorokina

Vali G. Gumerov

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

✉ tashir9891@mail.ru

Received by the editorial office: 01.05.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Yarullin A.I., Mukhammadiev Rishat S.,
Mukhammadiev Rinat S., Karimullina I.G.,
Sorokina D.A., Gumerov V.G.

Разработка способа получения антигена аденовируса первой подгруппы аденовирусной инфекции крупного рогатого скота

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Аденовирусная инфекция крупного рогатого скота остается одной из основных проблем современного молочного и мясного скотоводства. Эффективность оздоровительных мероприятий в интенсивном животноводстве зависит от своевременного выявления инфицированного скота, что в свою очередь обусловлено серологической активностью и специфичностью используемых в диагностических наборах антигенов.

Цель исследования — разработка способа очистки антигена аденовируса первой подгруппы аденовирусной инфекции крупного рогатого скота (КРС).

Методы. Серологическую активность компонентов возбудителя аденовирусной инфекции крупного рогатого скота исследовали с помощью метода иммуноблоттинга и иммуноферментного анализа. Получение антигена аденовируса КРС включало приготовление матровой раскладки аденовируса КРС на перевиваемой клеточной линии ВНК-21/13, наработку вирусной биомассы методом роллерного культивирования, разрушение инфицированных клеток ультразвуком и освобождение от клеточных фрагментов с помощью центрифугирования, осаждение антигена с применением ПЭГ-6000, концентрирование вируса через ступенчатый градиент хлористого цезия путем ультрацентрифугирования.

Результаты. В результате разделения вирусного материала в ступенчатом градиенте плотности хлористого цезия получены три антигенные фракции. Наиболее очищенной являлась фракция № 1, которая содержала мажорный участок с молекулярным весом 50,0 кДа и проявила максимальную антигенную активность. Титр антител, выявленный на 45-е сутки после иммунизации указанной фракцией, составил в сыворотке крови кроликов 1:3200. Полученные результаты открывают перспективы применения очищенного авторами антигена аденовируса первой подгруппы при конструировании тест-системы для проведения скрининговых исследований на аденовирусную инфекцию КРС и мониторинга эффективности противоэпизоотических мероприятий.

Ключевые слова: антиген, аденовирус первой подгруппы, аденовирусная инфекция, крупный рогатый скот, животноводство

Для цитирования: Яруллин А.И. и др. Разработка способа получения антигена аденовируса первой подгруппы аденовирусной инфекции крупного рогатого скота. *Аграрная наука*. 2025; 399 (10): 17–24.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-17-24>

Development of a method for obtaining bovine adenovirus subgroup 1 antigen

ABSTRACT

Relevance. Adenoviral infection of cattle remains one of the main problems of modern dairy and beef cattle breeding. The effectiveness of health measures in intensive livestock farming depends on the timely detection of infected livestock, which in turn is determined by the serological activity and specificity of the antigens used in diagnostic kits.

The aim of the study was to develop a method for purification of adenovirus antigen of the first subgroup of adenovirus infection in cattle (cattle).

Methods. The serological activity of the components of the causative agent of adenovirus infection in cattle was studied using the immunoblotting method and enzyme immunoassay. Obtaining the bovine adenovirus antigen included the preparation of a bovine adenovirus mat brood on BHK-21/13, the production of viral biomass by roller cultivation, the destruction of infected cells by ultrasound and the release of cellular fragments by centrifugation, precipitation of the antigen using PEG-6000, and concentration of the virus through a step gradient of cesium chloride by ultracentrifugation.

Results. As a result of separation of the viral material in a stepwise density gradient of cesium chloride, three antigenic fractions were obtained. The most purified was fraction № 1, which contained a major region with a molecular weight of 50.0 kDa and showed maximum antigenic activity. The antibody titer detected in the blood serum of rabbits on the 45th day after their immunization with this fraction was 1:3200. The results obtained open up prospects for the use of the adenovirus antigen of the first subgroup purified by the authors in the design of a test system for screening studies for adenovirus infection in cattle and monitoring the effectiveness of antiepidemic measures.

Key words: antigen, adenovirus subgroup 1, adenoviral infection, cattle, animal husbandry

For citation: Yarullin A.I. et al. Development of a method for obtaining bovine adenovirus subgroup 1 antigen. *Agrarian science*. 2025; 399 (10): 17–24 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-17-24>

Введение/Introduction

Респираторные и желудочно-кишечные инфекции КРС остаются одной из актуальных проблем ветеринарии как в нашей стране, так и за рубежом [1–4].

Эти болезни, протекающие преимущественно в виде смешанных инфекций, широко распространены в современных крупных молочных и мясных скотоводческих комплексах [5–8].

Современными исследованиями доказано, что возбудителями вирусного энтерита и респираторных заболеваний КРС являются вирусы инфекционного ринотрахеита, вирусной диареи, парагриппа-3, реовирусы и аденовирусы [2, 9, 10]. При этом последние могут играть первостепенную роль в развитии патологического состояния скота.

Появляющиеся данные по выделению аденовирусов в биоматериалах и выявлению специфических антител к ним в сыворотках крови КРС свидетельствуют о потенциальном расширении ареала распространения аденовирусной инфекции на территории Российской Федерации [11]. Тем не менее к настоящему времени отсутствуют четкие представления о нозогеографии аденовирусной инфекции КРС в хозяйствах нашей страны и не установлен наносимый ею экономический ущерб.

Одним из факторов, который осложняет диагностику аденовируса КРС, является большое количество его типов, обладающих генетическим разнообразием [12, 13]. В настоящий момент классифицированы 11 типов аденовируса КРС, принадлежащих родам *Mastadenovirus* (BAdV-1, BAdV-2, BAdV-3, BAdV-9 и BAdV-10) и *Atadenovirus* (BAdV-4, BAdV-5, BAdV-6, BAdV-7, BAdV-8 и BAdV-Rus) [13]. Для решения проблемы распространения аденовирусной инфекции КРС существенное внимание уделяется разработке новых, высокочувствительных и специфичных, простых в исполнении способов их диагностики^{1,2} [14, 15].

Указанным требованиям отвечают методы с использованием иммуноферментных тест-систем, с помощью которых имеется возможность индцировать специфические антитела в сыворотке крови животных [16, 17]. Однако проблема создания диагностических наборов, содержащих антигенные компоненты аденовирусов различных подгрупп, остается нерешенной.

Создание иммуноферментных тест-систем требует концентрирования и очистки специфических биологических их компонентов, в том числе антигенов [18–20].

Получение антигенов высокой степени очистки, несомненно, имеет практическую значимость, в связи с тем что увеличивает чувствительность серологических реакций и, следовательно,

эффективность лабораторной диагностики вирусной инфекции [21–23].

Разработка и совершенствование существующих методов получения высокоочищенных антигенных компонентов вируса аденовирусной инфекции представляют собой актуальную задачу ветеринарной медицины.

Цель данного исследования — разработка способа получения антигена аденовируса первой подгруппы аденовирусной инфекции КРС, выделенного из культуры клеток ВНК-21/13.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование проводили в лаборатории вирусологии отделения вирусологических и ультраструктурных исследований Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности» (ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ», Казань, Россия) в 2024 году.

Наработку культуральной суспензии штамма Adeno III WBR-1 аденовируса КРС осуществляли методом роллерного культивирования на перевиваемой культуре клеток ВНК-21/13. Для поддержания культуры клеток после заражения использовали среды 199 («ПанЭко», Россия), ГЛА (гидролизат лактальбумина) («ПанЭко», Россия) и «Игла MEM» с добавлением 1% L-глутамина и гентамицина («ПанЭко», Россия) в концентрации 50 мкг/мл.

В работе были использованы референтный штамм аденовируса КРС первой подгруппы (Adeno III WBR-1), полученный из государственной коллекции микроорганизмов ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ». Клеточная линия почки новорожденного сирийского хомячка (ВНК-21/13) получена из коллекции культур клеток и питательных сред отделения вирусологических и ультраструктурных исследований ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ».

Выделение вирусного антигена проводили методом ультразвуковой дезинтеграции остатков клеточного дебриса [24] с помощью гомогенизатора Bandelin Sonopuls HD 3100 (Bandelin, Германия) при следующих режимах: продолжительность озвучивания — 120 с., интервал между импульсами — 60 с., частота колебаний — 22 кГц, температура — плюс 4 °С. Полученный гомогенат ресуспендировали 0,5 М фосфатно-солевым буферным раствором (ФСБ, pH 7,3), осаждали центрифугированием при 4000 об/мин в течение 30 мин. и отбирали супернатант.

На второй стадии очистку антигена из полученного на предыдущем этапе супернатанта

¹ Лобова Т.П. Усовершенствование лабораторной диагностики аденовирусной инфекции крупного рогатого скота: специальность 16.00.03 «Ветеринарная микробиология, вирусология, эпизоотология, микология с микотоксикологией и иммунология»: автореф. дисс. ... канд. биол. наук Т.П. Лобовой. М.: Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина. 2006; 24.

² Гаффаров Х.З., Гумеров В.Г., Евстифеев В.В. Адено-, парво-, реовирусы и их роль в инфекционной патологии крупного рогатого скота. Казань: МедДок. 2021. 340. ISBN 978-5-6046634-6-2, EDN UJFWNC

проводили путем осаждения белков аденовируса реагентом ПЭГ-6000 [25] в конечной концентрации 8,0% при температуре +4 °С. Через 12 ч. получали осадок низкоскоростным центрифугированием при 9000 об/мин в течение 30 мин. и растворяли его в наименьшем объеме раствора 0,5 М ФСБ (рН 7,3). Полученный вирусный материал использовали для дальнейших этапов очистки аденовируса.

Далее очистку антигена аденовируса первой подгруппы осуществляли методом ультрацентрифугирования (УЦФ), применяя центрифугу Optima XE-100 (Beckman Coulter, США), в градиенте хлористого цезия [26]. Для формирования градиента плотности хлористого цезия в ультрацентрифужные пробирки (Beckman Coulter, США) последовательно добавляли равные объемы (по 3,0 мл) раствора хлористого цезия 10,0, 3,0 и 1,0 М. Поверх сформированного градиента наслаивали суспензию ПЭГ-осажденных антигенов (СПА) (4,0 мл), доводили объем до 15 мл 0,05 М фосфатно-солевым буфером (рН 7,2) (рис. 1). УЦФ осуществляли при 40 тыс. г и +4 °С в течение 3 ч.

Полученные белковые фракции подвергали исследованию с помощью электрофореза в 12,5%-ном полиакриламидном геле (ПААГ) в денатурирующих условиях (SDS-PAGE) и иммуноблоттинга с использованием гипериммунных (положительных) сывороток КРС для установления локализации полипептидов и их серологической активности [17].

На каждой стадии очистки антигена в полученных препаратах определяли концентрацию белка методом спектрофотометрии, используя прибор Multiskan Go (Thermo Fisher Scientific, США) [27]. Степень чистоты антигенных препаратов устанавливали аналитическим электрофорезом с применением вертикальной камеры Mini-Protean Tetra (Bio-Rad, США) [28].

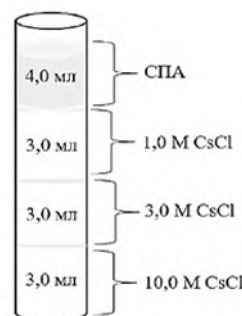
Иммунизацию опытных групп кроликов породы шиншилла ($n = 3$) массой 2,8–3,0 кг (из питомника ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ») проводили согласно следующей схеме: антигенные препараты в смеси с полным адъювантом Фрейнда вводили животным внутривенно в пяти точках с двух сторон в области спины в концентрации 100 мкг/гол [29]. Контролем служила группа животных ($n = 3$), которым вводили буферный раствор. На 45-е сутки у кроликов опытных и контрольной групп отбирали кровь для получения ее сыворотки.

Эксперименты с животными осуществляли строго, соблюдая требования ГОСТ 33215-2014 и Директиву ЕС 2010/63/EU.

Установление антител к полученным антигенным препаратам аденовируса первой подгруппы осуществляли в сыворотках крови кроликов непрямым вариантом иммуноферментного анализа (ИФА), как описано авторами ранее [29].

Рис. 1. Схема формирования градиента плотности хлористого цезия для очистки антигена аденовируса КРС первой подгруппы

Fig. 1. Scheme of formation of a density gradient of cesium chloride for purification of bovine adenovirus subgroup 1 antigen



Планшеты для ИФА сенсibilизировали антигенными препаратами в концентрации 10 мкг/мл в течение 12 ч. при +4 °С. Образцы сывороток животных использовали в последовательных двукратных разведениях, начиная с 1:200. Измерение светопоглощения осуществляли фотометром Bio-Rad 680 (Bio-Rad, США) при длине волны 450 нм. Титр антител рассчитывали по величине разведения сыворотки при условии, что значение оптической плотности исследуемого образца в 2 раза превышает контрольное.

Статистический анализ полученных результатов исследования осуществляли в программах MS Excel (США) и GraphPad Prism (США), применяя дисперсионный анализ (one-way ANOVA) и критерий Тьюки, и с помощью t-критерия Стьюдента. Достоверными считали данные с уровнем значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Основными требованиями, которые предъявляют к получаемым для диагностических наборов антигенам, являются качество последних (степень чистоты, серологическая активность, специфичность, способность связываться на поверхности твердофазного полистирола), а также сохранение указанных свойств при длительном хранении³ [30].

Методы выделения и очистки антигенных препаратов характеризуются рядом специфических особенностей, которые в основном обусловлены крайней неустойчивостью молекулы антигена и потерей вышеуказанных свойств под воздействием различных факторов внешней среды [18, 29]. В связи с этим при выделении и очистке препаратов антигенов необходим индивидуальный подход, позволяющий повышать выход белка при одновременном уменьшении количества этапов очистки. В большинстве случаев антигены выделяют и очищают, используя мощные комбинации различных приемов осаждения и методов разделения [17, 26].

³ Барышников П.И., Разумовская В.В. (сост.). Лабораторная диагностика вирусных болезней животных. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки (специальность) «Ветеринария» (квалификация (степень) «Ветеринарный врач»). 2-е изд., испр. СПб.: Лань. 2015; 671.

В исследованиях авторов схема получения антигена аденовируса КРС первой подгруппы включала несколько этапов: приготовление матровой раскладки аденовируса КРС на перевиваемой клеточной линии ВНК-21/13; наработку вирусной биомассы методом роллерного культивирования; разрушение инфицированных клеток ультразвуком и освобождение от клеточных фрагментов с помощью центрифугирования; осаждение антигена с применением ПЭГ-6000, концентрирование вируса через ступенчатый градиент хлористого цезия путем УЦФ; сбор целевых фракций (рис. 2).

Применение роллерной технологии культивирования аденовируса позволило получить вирусную массу с инфекционной активностью $4,75 \pm 0,03 \text{ Ig ТЦД}_{50}/\text{мл}$. В раннем исследовании авторов [31] выявлено преимущество указанной технологии для получения более высокого выхода вирусных частиц по сравнению с технологией стационарного культивирования.

После разрушения инфицированных клеток ультразвуком в полученном клеточном супернатанте концентрация белка составила $0,72 \pm 0,01 \text{ мг/мл}$ (рис. 4). Потеря содержания белка на этапе осаждения протеинов с применением ПЭГ-6000 составила 53,1%. Данный метод позволяет антигенный осадок без дополнительных стадий переводить в раствор используемого в исследовании буфера и использовать для дальнейших этапов очистки [25].

На следующем этапе получения антигена аденовируса КРС первой подгруппы авторами был применен метод фракционирования ПЭГ-осажденного препарата в ступенчатом градиенте плотности хлористого цезия. В результате исследований получены три основные антигенные фракции (препараты) (рис. 3), каждая из которых была отобрана для исследования с помощью аналитического электрофореза, в реакциях вестерн-блоттинга и ИФА.

Наибольшее содержание белка было выявлено во фракции № 3 ($19,50 \pm 0,48 \text{ мг/мл}$), наименьшее — во фракции № 1 ($1,87 \pm 0,04 \text{ мг/мл}$) (рис. 4).

Определение чистоты препаратов методом вертикального электрофореза в ПААГ показало, что после УЦФ во всех исследованных образцах обнаруживались полипептиды с молекулярной массой от 35,0 до 50,0 кДа. Необходимо отметить, что на электрофореграммах выявлялись дополнительные белковые полосы, свидетельствуя о наличии балластных белков.

Посредством иммуноблоттинга с использованием гипериммунных сывороток КРС были установлены активность и специфичность белковых фракций аденовируса (рис. 5, 6).

Исходя из распределения антигенных фракций, можно заключить, что большая часть материала распределена в области с молекулярной массой 50,0 и 45,0 кДа. Полученные авторами препараты с указанным молекулярным весом, вероятно, относятся к протеинам Iva2, E1B-420R или pV,

Рис. 2. Схема получения антигена аденовируса первой подгруппы КРС

Fig. 2. Scheme for obtaining bovine adenovirus subgroup 1 antigen

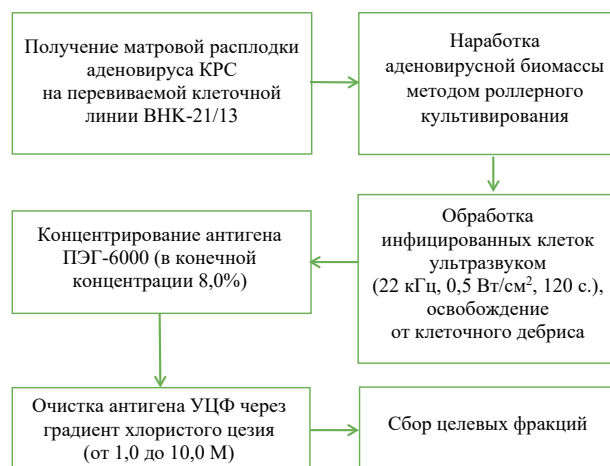


Рис. 3. Результаты фракционирования вирусного материала, содержащего антиген аденовируса КРС первой подгруппы, в ступенчатом градиенте плотности хлористого цезия (стрелками указаны полученные антигенные фракции)

Fig. 3. Results of fractionation of viral material containing bovine adenovirus subgroup 1 antigen in a stepwise density gradient of cesium chloride (the arrows indicate the obtained antigen fractions)



Рис. 4. Содержание белка (мг/мл) в антигенных фракциях после ультрацентрифугирования в ступенчатом градиенте хлористого цезия

Fig. 4. Protein content (mg/ml) in antigenic fractions after ultracentrifugation in stepwise gradient of cesium chloride

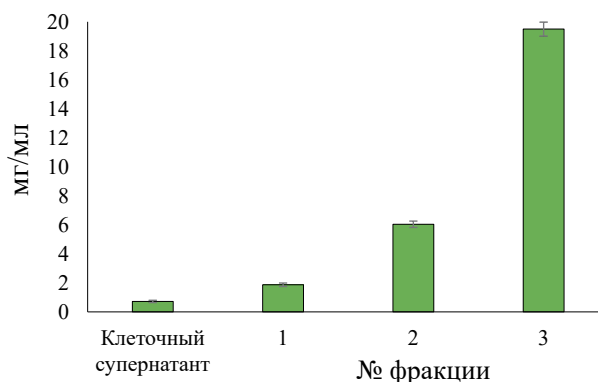
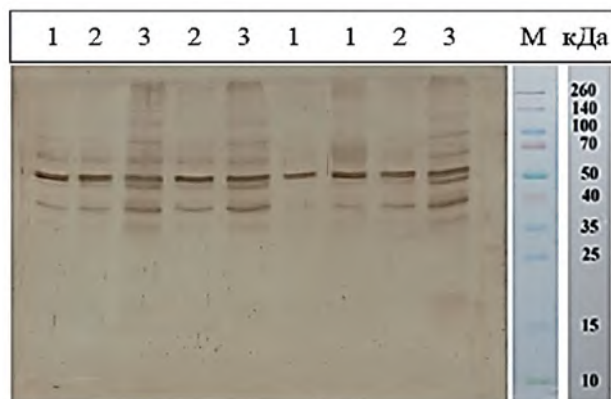


Рис. 5. Результаты вестерн-блота антигена аденовируса первой подгруппы со специфической сывороткой к антигену аденовируса КРС второй подгруппы. Треки: 1 — фракция № 1, 2 — фракция № 2, 3 — фракция № 3, М — белки-маркеры молекулярных масс Spectra, 10–260 кДа (Thermo FS, США)

Fig. 5. Results of a Western blot of adenovirus antigen of the first subgroup with specific serum for the bovine adenovirus antigen of the second subgroup. Tracks: 1 — fraction No. 1, 2 — fraction No. 2, 3 — fraction No. 3, M — Spectra molecular weight marker proteins, 10–260 kDa (Thermo FS, USA)



способным к участию в процессе патогенеза аденовирусной инфекции [32, 33]. Дальнейшие исследования протективного потенциала выявленных антигенов открывают перспективы применения последних в качестве компонентов различных типов вакцин и тест-системы ИФА для диагностики аденовирусной инфекции КРС.

Активность и специфичность антигенных препаратов установлены непрямым вариантом ИФА с использованием контрольных (K^+ (положительной) и K^- (отрицательной) сывороток КРС (табл.).

Серологическую активность проявили все полученные антигенные препараты. При этом значения OP_{450} для препаратов № 1–3 при разведении сыворотки K^+ 1:200 составили, соответственно, $1,271 \pm 0,030$ ОЕ ($K^+/K^- = 9,08$), $0,996 \pm 0,024$ ОЕ ($K^+/K^- = 6,47$) и $1,453 \pm 0,035$ ОЕ ($K^+/K^- = 2,63$).

Рис. 7. Накопление специфических антител у кроликов, иммунизированных антигенными препаратами аденовируса КРС первой подгруппы

Fig. 7. Accumulation of specific antibodies in rabbits immunized with antigen preparations of bovine adenovirus subgroup 1

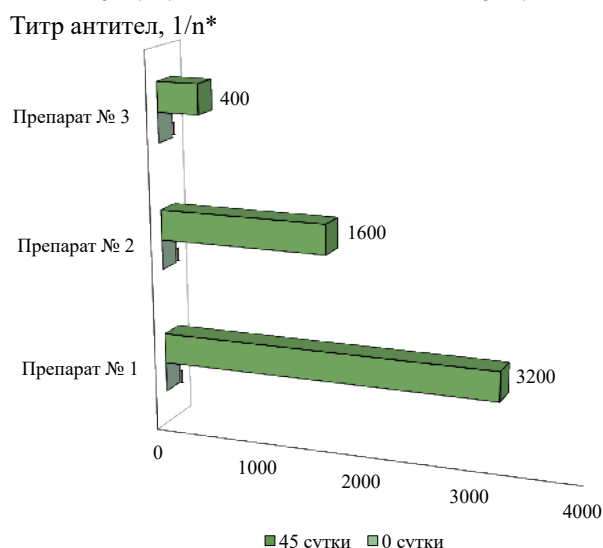


Рис. 6. Результаты вестерн-блота антигена аденовируса КРС первой подгруппы со специфической сывороткой к антигену аденовируса КРС первой подгруппы. Треки: 1 — фракция № 1, 2 — фракция № 2, 3 — фракция № 3, М — белки-маркеры молекулярных масс Spectra, 10–260 кДа (Thermo FS, США)

Fig. 6. The results of a Western blot of the bovine adenovirus antigen of the first subgroup with a specific serum for the bovine adenovirus antigen of the first subgroup. Tracks: 1 — fraction No. 1, 2 — fraction No. 2, 3 — fraction No. 3, M — Spectra molecular weight marker proteins, 10–260 kDa (Thermo FS, USA)

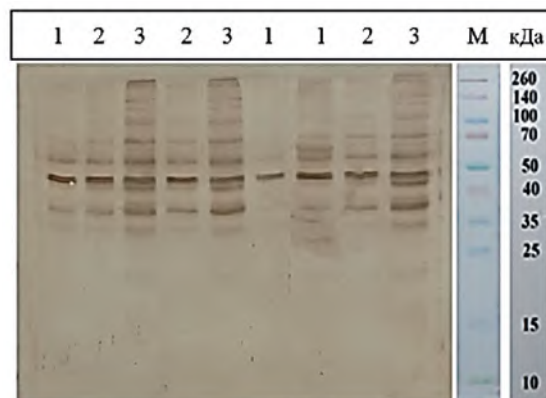


Таблица. Результаты определения активности и специфичность антигенных препаратов посредством ИФА*

Table. Results of determination of activity and specificity of antigen preparations by means of ELISA*

№ антигенного препарата	ОП ₄₅₀ ОЕ		
	K^+	K^-	K^+/K^-
1	$1,271 \pm 0,030$	$0,140 \pm 0,002$	9,08
2	$0,996 \pm 0,024$	$0,154 \pm 0,003$	6,47
3	$1,453 \pm 0,035$	$0,552 \pm 0,010$	2,63

Примечание: * при постановке реакции использованы разведенные 0,05 М карбонатно-бикарбонатным буферным раствором (рН 9,6) антигенные препараты в концентрации 10 мкг/мл, разведенные 0,05 М фосфатно-солевым буферным раствором (рН 7,3) с твином в 200 раз сыворотки

Следовательно, наиболее перспективным для использования в качестве антигенного компонента тест-системы ИФА для серологической диагностики аденовирусной инфекции КРС являлся препарат № 1.

Для получения препаратов иммуноглобулинов авторами осуществлена оценка возможности использования очищенных антигенных препаратов аденовируса первой подгруппы в качестве иммунизирующих агентов (рис. 7).

При исследовании сывороток крови кроликов на 45-е сутки после введения антигенных препаратов был установлен прирост титров специфических антител на уровне 1:400–1:3200.

Антигенная специфичность очищенного авторами аденовирусного протеина и возможность применения последнего как иммунизирующего агента подтверждают эффективность предложенного способа получения антигена аденовируса КРС первой подгруппы.

Разработанный способ получения антигена может быть использован для получения антигенных препаратов вирусов — возбудителей, опасных для сельскохозяйственных животных инфекций.

Выводы/Conclusions

Предложенный авторами способ получения антигена аденовируса КРС первой подгруппы, который включает приготовление матровой рас- плодки вируса на перевиваемой клеточной линии ВНК-21/13, наработку вирусной биомассы методом роллерного культивирования, разрушение инфицированных клеток ультразвуком и освобождение от клеточных фрагментов центрифугированием, осаждение антигена с применением ПЭГ-6000 и

концентрирование последнего через ступенчатый градиент хлористого цезия путем УЦФ, позволили получить очищенный препарат, содержащий протеин с молекулярной массой 50,0 кДа и проявляющий высокую антигенную активность.

Дальнейшие исследования открывают перспективы применения очищенного антигена аденовируса для конструирования тест-системы ИФА с целью серологической диагностики аденовирусной инфекции КРС.

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. Галеева А.Г. и др. Идентификация вариантов вируса вирусной диареи крупного рогатого скота — контаминантов производственных клеточных линий. *Аграрная наука*. 2025; (2): 61–66. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-61-66>
2. Gaudino M., Nagamine B., Ducatez M.F., Meyer G. Understanding the mechanisms of viral and bacterial coinfections in bovine respiratory disease: a comprehensive literature review of experimental evidence. *Veterinary Research*. 2022; 53: 70. <https://doi.org/10.1186/s13567-022-01086-1>
3. Лобова Т.П., Михайлова В.В., Скворцова А.Н., Шишкина М.С. Верификация тест-системы для выявления антител к вирусу диареи крупного рогатого скота иммуноферментным методом «ВД КРС — СЕРОТЕСТ плюс». *Аграрная наука*. 2024; 379(2): 48–52. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-48-52>
4. Dyakonova A., Siben A. Dangerous bacterial infections of farm animals in Russia and the Tyumen region. *International Scientific and Practical Conference "From Modernization to Rapid Development: Ensuring Competitiveness and Scientific Leadership of the Agro-Industrial Complex" (IDSISA 2024)*. *BIO Web of Conferences*. 2024; 108: 03010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410803010>
5. Makarova V.N., Badeeva O.B., Simanova I.N., Korukina M.V. Etiology and diagnosis of the gastrointestinal and respiratory diseases of calves in the farms of the Vologda region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548: 072027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/7/072027>
6. Батомункуев А.С., Греченко Ю.А. Вирусные инфекционные болезни крупного рогатого скота в Иркутской области. *Вестник ИргСХА*. 2020; 101: 112–119. <https://www.elibrary.ru/jlbqrm>
7. de Jong A. et al. Antimicrobial susceptibility among respiratory tract pathogens isolated from diseased cattle and pigs from different parts of Europe. *Journal of Applied Microbiology*. 2023; 134(8): 1xad132. <https://doi.org/10.1093/jambio/1xad132>
8. Panghal R., Dahiya S., Gupta A.K., Sharma V., Bangar Y., Kakker N.K. Persistence of maternal antibodies in calves born of combined foot-and-mouth disease + haemorrhagic septicaemia vaccinated buffaloes at organized dairy farm. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2023; 93(8): 759–763. <https://doi.org/10.56093/ijans.v93i8.127857>
9. Лартон Р.Р., Алимов А.М. Экспресс-индикация возбудителей вирусной диареи, инфекционного ринотрахеита, парагриппа-3 крупного рогатого скота. *Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки*. 2022; 8(1): 35–41. <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2022-8-1-35-41>
10. Красочко П.А., Красочко И.А., Целуева Н.И., Дмитриев К.А. Изучение поствакцинальных антител у коров к вирусам, вызывающим респираторные инфекции. *Актуальные проблемы лечения и профилактики болезней молодняка: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию учреждения образования «Витебская ордена «Знак Почёта» государственная академия ветеринарной медицины»*. Витебск: Витебская государственная академия ветеринарной медицины. 2024; 183–188. <https://www.elibrary.ru/wmwjhf>
11. Гумеров В.Г. и др. Сероиммунологический мониторинг аденовирусной инфекции крупного рогатого скота в животноводческих хозяйствах Приволжского федерального округа. *Инновационные решения актуальных вопросов биобезопасности. Сборник материалов Международной научно-практической конференции*. Казань: Альянс. 2022; 173–176. <https://www.elibrary.ru/teqjaa>

REFERENCES

1. Galeeva A.G. et al. Identification of bovine viral diarrhea virus variants — contaminants of industrial cell lines. *Agrarian science*. 2025; (2): 61–66 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-61-66>
2. Gaudino M., Nagamine B., Ducatez M.F., Meyer G. Understanding the mechanisms of viral and bacterial coinfections in bovine respiratory disease: a comprehensive literature review of experimental evidence. *Veterinary Research*. 2022; 53: 70. <https://doi.org/10.1186/s13567-022-01086-1>
3. Lobova T.P., Mikhailova V.V., Skvortsova A.N., Shishkina M.S. Verification of a test system for detecting antibodies to bovine diarrhea virus using the enzyme immunoassay method "Cattle VD — SEROTEST plus". *Agrarian science*. 2024; 379(2): 48–52 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-48-52>
4. Dyakonova A., Siben A. Dangerous bacterial infections of farm animals in Russia and the Tyumen region. *International Scientific and Practical Conference "From Modernization to Rapid Development: Ensuring Competitiveness and Scientific Leadership of the Agro-Industrial Complex" (IDSISA 2024)*. *BIO Web of Conferences*. 2024; 108: 03010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410803010>
5. Makarova V.N., Badeeva O.B., Simanova I.N., Korukina M.V. Etiology and diagnosis of the gastrointestinal and respiratory diseases of calves in the farms of the Vologda region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548: 072027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/7/072027>
6. Batomunkuev A.S., Gretchenko Yu.A. Viral infectious diseases of cattle in the Irkutsk region. *Vestnik IrGSHA*. 2020; 101: 112–119 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/jlbqrm>
7. de Jong A. et al. Antimicrobial susceptibility among respiratory tract pathogens isolated from diseased cattle and pigs from different parts of Europe. *Journal of Applied Microbiology*. 2023; 134(8): 1xad132. <https://doi.org/10.1093/jambio/1xad132>
8. Panghal R., Dahiya S., Gupta A.K., Sharma V., Bangar Y., Kakker N.K. Persistence of maternal antibodies in calves born of combined foot-and-mouth disease + haemorrhagic septicaemia vaccinated buffaloes at organized dairy farm. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2023; 93(8): 759–763. <https://doi.org/10.56093/ijans.v93i8.127857>
9. Larton R.R., Alimov A.M. Express indication of pathogens of viral diarrhea, infectious rhinotracheitis, parainfluenza-3 in cattle. *Bulletin of the Mari State University. Series: Agricultural Sciences. Economic sciences*. 2022; 8(1): 35–41 (in Russian). <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2022-8-1-35-41>
10. Krasochko P.A., Krasochko I.A., Tselueva N.I., Dmitriev K.A. Study of post-vaccination antibodies in cows to viruses causing respiratory infections. *Actual problems of treatment and prevention of diseases of young animals: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the educational institution "Vitebsk Order of the Badge of Honor State Academy of Veterinary Medicine"*. Vitebsk: Vitebsk State Academy of Veterinary Medicine. 2024; 183–188 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wmwjhf>
11. Gumerov V.G. et al. Seroimmunological monitoring of bovine adenovirus infection in livestock farms of the Volga federal district. *Innovative solutions to current biosafety issues. Materials of the International scientific and practical conference*. Kazan: Alliance. 2022; 173–176 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/teqjaa>

12. Paim W.P. *et al.* Identification and genetic characterization of an isolate of bovine adenovirus 7 from the United States, a putative member of a new species in the genus *Atadenovirus*. *Archives of Virology*. 2021; 166(10): 2835–2839. <https://doi.org/10.1007/s00705-021-05184-x>
13. Jesse S.T. *et al.* Molecular characterization of a bovine adenovirus type 7 (Bovine Atadenovirus F) strain isolated from a systemically infected calf in Germany. *Virology Journal*. 2022; 19: 89. <https://doi.org/10.1186/s12985-022-01817-y>
14. 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>
15. Яруллин А.И. и др. Оценка серопревалентности аденовирусной инфекции крупного рогатого скота в некоторых животноводческих хозяйствах. *Инновационные решения актуальных вопросов биологической и токсикологической безопасности: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Казань. 2023; 214–216. <https://www.elibrary.ru/knzcne>
16. Спиридонов А.Г. Иммуноферментный метод диагностики анаэробной энтеротоксемии животных. *Ветеринарный врач*. 2018; (6): 26–29. <https://www.elibrary.ru/yqvejn>
17. Горбунова М.Е., Усольцев К.В., Шангараев Р.И., Громова Е.А., Хаертынов К.С., Галеева А.Г. Очистка антигенов вируса лейкоза крупного рогатого скота методом ультрацентрифугирования. *Ветеринарный врач*. 2024; (2): 43–48. <https://www.elibrary.ru/wdipnk>
18. Ефимова М.А. и др. Выделение, очистка и оценка серологической активности антигенов вируса бешенства. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2017; (4): 27–31. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2017-4-27-31>
19. Ефимова М.А. и др. Выделение гликопротеина вируса бешенства методом трехфазной экстракции и характеристика его антигенных свойств. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2022; (1): 86–93. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-1-86-93>
20. Savelieva E., Avdeenko A. The use of antigens derived from *Bacillus thuringiensis* bacteria for further differentiation. *Heliyon*. 2024; 10(8): e29744. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29744>
21. Мухамеджанова А.Г., Ефимова М.А., Чернов А.Н., Хаертынов К.С., Ахмадеев Р.М. Получение антигена вируса бешенства и оценка его активности и специфичности. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2018; 236: 138–142. <https://www.elibrary.ru/pjtypr>
22. Земсков А.М., Земскова В.А., Бакулева Н.И. Современные инфекции. Принципы диагностики и лечения. *Иммунопатология, аллергология, инфектология*. 2024; 2: 30–36. <https://doi.org/10.14427/jipai.2024.2.30>
23. Нестеренко Л.Н., Алаторцева Г.И., Амиантова И.И., Крымский М.А., Борисова В.Н. Обнаружение антигена вируса гепатита Е в образцах воды и молока с помощью иммунохроматографической тест-системы. *Лабораторная диагностика. Восточная Европа*. 2024; 13(S1): 192–194. <https://www.elibrary.ru/yrvlmw>
24. Ахмадеев Р.М. и др. Получение антигена вируса бешенства методом трехфазной экстракции. *Ветеринарный врач*. 2020; (5): 26–33. <https://www.elibrary.ru/cuhfmc>
25. Глазкова Д.В., Михайлюк Е.А., Шипулин Г.А., Богословская Е.В. Очистка аденоассоциированного вируса DJ методом анионообменной хроматографии: оптимизация условий. *Биотехнология*. 2023; 39(4): 68–80. <https://doi.org/10.56304/S023427582304004X>
26. Nasukawa T. *et al.* Virus purification by CsCl density gradient using general centrifugation. *Archives of Virology*. 2017; 162(11): 3523–3528. <https://doi.org/10.1007/s00705-017-3513-z>
27. Зулфугарова С.Т., Рустамова С.М., Гусейнова И.М. Активность антиоксидантных ферментов и термостабильность мембран у генотипов твердой пшеницы при тепловом стрессе. *Аграрная наука*. 2022; (2): 56–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-356-2-56-61>
28. Laemmli U.K. Cleavage of Structural Proteins during the Assembly of the Head of Bacteriophage T4. *Nature*. 1970; 227(5259): 680–685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
29. Мухаммадиев Р.С. и др. Очистка антигенов штамма ТК-А (ВИЭВ)-В2 бычьего альфагерпесвируса биотипа 1. *Ветеринария Кубани*. 2025; (3): 1–7. <https://doi.org/10.33861/2071-8020-2025-3-3-7>
12. Paim W.P. *et al.* Identification and genetic characterization of an isolate of bovine adenovirus 7 from the United States, a putative member of a new species in the genus *Atadenovirus*. *Archives of Virology*. 2021; 166(10): 2835–2839. <https://doi.org/10.1007/s00705-021-05184-x>
13. Jesse S.T. *et al.* Molecular characterization of a bovine adenovirus type 7 (Bovine Atadenovirus F) strain isolated from a systemically infected calf in Germany. *Virology Journal*. 2022; 19: 89. <https://doi.org/10.1186/s12985-022-01817-y>
14. 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>
15. Yarullin A.I. *et al.* Assessment of seroprevalence of bovine adenovirus infection in some livestock farms. *Innovative solutions to current issues of biological and toxicological safety: Collection of materials from the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Kazan. 2023; 214–216 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/knzcne>
16. Spiridonov A.G. Enzyme linked immunoassay (ELISA) method for diagnostics of animals anaerobic enterotoxemia. *Veterinary vrach*. 2018; (6): 26–29 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yqvejn>
17. Gorbunova M.E., Usoltsev K.V., Shangaraev R.I., Gromova E.A., Khaertynov K.S., Galeeva A.G. Purification of bovine leukemia virus antigens by ultracentrifugation. *Veterinary vrach*. 2024; (2): 43–48 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wdipnk>
18. Efimova M.A. *et al.* Isolation, Purification and Evaluation of Serological Activity of Rabies Virus Antigens. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2017; (4): 27–31 (in Russian). <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2017-4-27-31>
19. Efimova M.A. *et al.* Isolation of Rabies Virus Glycoprotein Using Three-Phase Extraction and Characteristics of its Antigenic Properties. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2022; (1): 86–93 (in Russian). <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-1-86-93>
20. Savelieva E., Avdeenko A. The use of antigens derived from *Bacillus thuringiensis* bacteria for further differentiation. *Heliyon*. 2024; 10(8): e29744. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29744>
21. Mukhamedzhanova A.G., Efimova M.A., Chernov A.N., Khaertynov K.S., Akhmadeev R.M. Obtaining rabies virus antigen and assessment of its activity and specificity in immunosorbent assay and immunoblot. *Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2018; 236: 138–142 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pjtypr>
22. Zemskov A.M., Zemskova V.A., Bakuleva N.I. Modern infections. Principles of diagnosis and treatment. *Immunopathology, allergology, infectology*. 2024; 2: 30–36 (in Russian). <https://doi.org/10.14427/jipai.2024.2.30>
23. Nesterenko L.N., Alatorseva G.I., Amiantova I.I., Krymsky M.A., Borisova V.N. Detection of hepatitis E virus antigen in water and milk samples using an immunochromatographic test system. *Laboratory diagnostics. Eastern Europe (Laboratornaya diagnostika. Vostochnaya Yevropa)*. 2024; 13(S1): 192–194 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yrvlmw>
24. Akhmadeev R.M. *et al.* Obtaining rabies virus antigen by three-phase extraction. *Veterinary vrach*. 2020; (5): 26–33 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/cuhfmc>
25. Glazkova D.V., Mikhaylyuk E.A., Shipulin G.A., Bogoslovskaya E.V. Purification of adeno-associated DJ virus by anion-exchange chromatography: optimization of conditions. *Biotechnology*. 2023; 39(4): 68–80 (in Russian). <https://doi.org/10.56304/S023427582304004X>
26. Nasukawa T. *et al.* Virus purification by CsCl density gradient using general centrifugation. *Archives of Virology*. 2017; 162(11): 3523–3528. <https://doi.org/10.1007/s00705-017-3513-z>
27. Zulfugarova S.T., Rustamova S.M., Huseynova I.M. Antioxidant enzymes activity and membrane thermostability in durum wheat genotypes under heat stress. *Agrarian science*. 2022; (2): 56–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-356-2-56-61>
28. Laemmli U.K. Cleavage of Structural Proteins during the Assembly of the Head of Bacteriophage T4. *Nature*. 1970; 227(5259): 680–685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
29. Mukhammadiyev R.S. *et al.* Purification of antigens from bovine alphaherpesvirus biotype 1 strain TK-A (VIEV)-B2. *Veterinaria Kubani*. 2025; (3): 1–7 (in Russian). <https://doi.org/10.33861/2071-8020-2025-3-3-7>

30. Смелянский В.П. и др. Сравнительная оценка диагностических препаратов на основе антигенов коксиселл Бернета, выделенных разными методами. Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. 2009; 3(31): 21–23. <https://www.elibrary.ru/plumfl>

31. Каримуллина И.Г. и др. Подбор условий выращивания бычьего герпесвируса и бычьего вируса вирусной диареи на культурах клеток. Ветеринарный врач. 2025; (2): 68–76. <https://www.elibrary.ru/hltmvm>

32. Woldemariam T., Wang W., Said A., Tikoo S.K. Regions of bovine adenovirus-3 IVa2 involved in nuclear/nucleolar localization and interaction with pV. *Virology*. 2020; 546: 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2020.04.006>

33. Zhao X., Tikoo S.K. Nuclear and Nucleolar Localization of Bovine Adenovirus-3 Protein V. *Frontiers in Microbiology*. 2020; 11: 579593. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.579593>

ОБ АВТОРАХ

Айнур Ильнурович Яруллин

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

Ришат Салаватович Мухаммадиев

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
tashir9891@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7812-9168>

Ринат Салаватович Мухаммадиев

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
tanirtashir@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2524-9609>

Ильсияр Габделгазизовна Каримуллина

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
89047699225@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6771-3457>

Диана Анатольевна Сорокина

младший научный сотрудник
diana-sorokina2013@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5339-5175>

Вали Галиевич Гумеров

доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник
gumerowali@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5878-4299>

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

30. Smelyansky V.P. et al. Comparative evaluation of diagnostic preparations based on Coxiella Burnetii antigens isolated by different methods. *Bulletin of the Volgograd State Medical University*. 2009; 3(31): 21–23 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/plumfl>

31. Karimullina I.G. et al. Selection of conditions for growing bovine herpes virus and bovine viral diarrhea virus on cell cultures. *Veterinary vrach*. 2025; (2): 68–76 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/hltmvm>

32. Woldemariam T., Wang W., Said A., Tikoo S.K. Regions of bovine adenovirus-3 IVa2 involved in nuclear/nucleolar localization and interaction with pV. *Virology*. 2020; 546: 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2020.04.006>

33. Zhao X., Tikoo S.K. Nuclear and Nucleolar Localization of Bovine Adenovirus-3 Protein V. *Frontiers in Microbiology*. 2020; 11: 579593. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.579593>

ABOUT THE AUTHORS

Ainur Ilnurovich Yarullin

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

Rishat Salavatovich Mukhammadiev

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
tashir9891@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7812-9168>

Rinat Salavatovich Mukhammadiev

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
tanirtashir@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2524-9609>

Ilsiyar Gabdelgazizovna Karimullina

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
89047699225@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6771-3457>

Diana Anatolyevna Sorokina

Junior Researcher
diana-sorokina2013@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5339-5175>

Vali Galievich Gumerov

Doctor of Veterinary Sciences, Leading Researcher
gumerowali@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5878-4299>

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



Подпишитесь на Telegram канал
ИД «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

УДК 619:615.849.19

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-25-31

Н.А. Чуев

Красноярский государственный
аграрный университет, Красноярск,
Россия

✉ ivachka.2016@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Чуев Н.А.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-25-31

Nikita A. Chuev

Krasnoyarsk State Agrarian University,
Krasnoyarsk, Russia

✉ ivachka.2016@mail.ru

Received by the editorial office: 24.07.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Chuev N.A.

Применение фонофореза и ранозаживляющей повязки на основе коллаген-хитозанового комплекса «Коллахит-ФА» при лечении поверхностных ран у кроликов

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Поверхностные раны являются одним из наиболее распространенных повреждений у домашних и сельскохозяйственных животных. Их заживление осложняется такими факторами, как условия содержания, образ жизни и несвоевременное обращение к ветеринарным специалистам. В связи с этим поиск эффективных методов лечения, ускоряющих регенерацию тканей, остается актуальной задачей в ветеринарной медицине.

Цель работы — оценка эффективности комбинированного применения ранозаживляющего покрытия «Коллахит-ФА» и фонофореза в сравнении с использованием только раневого покрытия «Коллахит-ФА».

Методы. Работа выполнена на базе стационара для содержания животных, в клинике «Вита» и гистологической лаборатории Красноярского государственного аграрного университета. Для эксперимента были выбраны самки кроликов-гибридов по принципу аналогов, содержащиеся в одинаковых условиях. Материалом для исследования послужили смоделированные раны, образцы тканей для гистологических исследований. Методология исследования включала морфометрические, макроскопические и гистологические методы.

Результаты. Установлено, что в опытной группе (фонофорез + «Коллахит-ФА») площадь раневой поверхности сокращалась быстрее: к 28-м суткам она составила $3,86 \pm 0,23 \text{ см}^2$ (на 6,8% меньше, чем в контрольной группе; $p < 0,05$). Гистологический анализ подтвердил ускорение репаративных процессов: к 21-м суткам в опытной группе наблюдалось полное восстановление эпителия, в контрольной группе базальная мембрана оставалась неровной, а эпителий — незрелым. К 28-му дню в опытных группах отмечали полное заживление кожного покрова. Таким образом, сочетание ранозаживляющего покрытия «Коллахит-ФА» с ультразвуковой стимуляцией значительно ускоряет регенерацию тканей у животных.

Ключевые слова: раны, фонофорез, кролики, коллаген-хитозановый комплекс, «Коллахит-ФА», морфометрия, гистология

Для цитирования: Чуев Н.А. Применение фонофореза и ранозаживляющей повязки на основе коллаген-хитозанового комплекса «Коллахит-ФА» при лечении поверхностных ран у кроликов. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 25–31. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-25-31>

The use of phonophoresis and wound healing dressing based on “Collachit-FA” collagen chitosan complex in the treatment of superficial wounds in rabbits

ABSTRACT

Relevance. Superficial wounds are one of the most common injuries in domestic and farm animals. Their healing is complicated by factors such as conditions of detention, lifestyle and untimely access to veterinary specialists. In this regard, the search for effective treatment methods that accelerate tissue regeneration remains an urgent task in veterinary medicine.

The aim of the work is to evaluate the effectiveness of the combined use of the “Collachit-FA” wound healing coating and phonophoresis in comparison with using only the “Collachit-FA” wound coating.

Methods. The work was performed on the basis of the animal hospital, the Vita clinic and the histological laboratory of the Krasnoyarsk State Agrarian University. For the experiment, female hybrid rabbits were selected according to the principle of analogues, kept in the same conditions. The material for the study was modeled wounds, tissue samples for histological studies. The research methodology included morphometric, macroscopic and histological methods.

Results. It was found that in the experimental group (phonophoresis + “Collachit-FA”), the wound surface area decreased faster: by the 28th day, it was $3.86 \pm 0.23 \text{ cm}^2$ (6.8% less than in the control group; $p < 0.05$). Histological analysis confirmed the acceleration of reparative processes: by day 21, complete restoration of the epithelium was observed in the experimental group, while in the control group the basement membrane remained uneven and the epithelium was immature. By day 28, complete healing of the skin was noted in the experimental groups. Thus, the combination of “Collachit-FA” wound healing coating with ultrasound stimulation significantly accelerates tissue regeneration in animals.

Key words: wounds, phonophoresis, rabbits, collagen-chitosan complex, “Collachit-FA”, morphometry, histology

For citation: Chuev N.A. The use of phonophoresis and wound healing dressing based on collagen chitosan complex “Collachit-FA” in the treatment of superficial wounds in rabbits. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 25–31 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-25-31>

Введение/Introduction

В современной ветеринарной практике сохраняется острая потребность в создании высокоэффективных перевязочных средств, обеспечивающих ускоренную тканевую регенерацию, профилактику инфекционных осложнений и снижение риска развития неблагоприятных последствий при лечении раневых процессов [1–5]. Особый интерес в данном контексте представляет изучение терапевтических свойств раневой повязки «Коллахит-ФА» в отношении поверхностных повреждений у кроликов.

Поверхностные раневые поражения занимают лидирующее положение в структуре травматических повреждений у животных. Отсутствие своевременной и адекватной терапии нередко приводит к развитию осложнений, требующих хирургического вмешательства и длительного дерматологического лечения [6–9]. Несмотря на широкий ассортимент современных перевязочных материалов, сохраняется актуальность разработки средств, обладающих оптимальным сочетанием биологической совместимости, антимикробной активности и стимулирующего воздействия на репаративные процессы [10–13].

Особенностью повязки «Коллахит-ФА» является ее композитный состав, включающий коллаген и хитозан, что обеспечивает комплексное терапевтическое действие. Материал демонстрирует выраженные гемостатические свойства, антибактериальную активность и способность поддерживать оптимальный уровень влажности в раневом ложе, создавая благоприятные условия для регенерации [14–19]. Однако если в клинической медицине механизмы действия данного материала изучены достаточно подробно, то в ветеринарной практике, особенно в отношении кроликов, экспериментальных данных недостаточно [20, 21].

Проведение настоящего исследования обусловлено необходимостью научного обоснования применения повязки «Коллахит-ФА» в ветеринарии. Полученные результаты позволят усовершенствовать методы раневой терапии, сократить сроки восстановительного периода и улучшить качество оказания помощи травмированным животным.

Цель исследования — оценка эффективности комбинации применения ранозаживляющей повязки на основе коллаген-хитозанового комплекса «Коллахит-ФА» и фонофореза при лечении ран у кроликов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Работа выполнена на базе стационара для содержания животных, в клинике «Вита» и гистологической лаборатории Красноярского государственного аграрного университета в 2024 году.

Обращение с животными проходило в соответствии с Рекомендацией Коллегии ЕЭК от

14.11.2023 № 33¹, что подчеркивает соблюдение этических стандартов в экспериментальной биологии.

Для эксперимента были выбраны самки кроликов-гибридов по принципу аналогов массой 2,0–2,5 кг.

Кролики трех групп содержались в одинаковых условиях стационара в оборудованных двухъярусных клетках при температурном режиме от +12 до +18 °С и естественном освещении с 6:00 до 21:00 (в весенний период).

Животные получали комбинированное питание (зерно, сено, сочные корма, овощи) два раза в сутки.

Процедура нанесения раны была стандартизирована — использование трафарета 5,0 x 5,0 см и стерильного инструментария, что позволяет минимизировать вариабельность в эксперименте и обеспечить идентичность условий для всех подопытных животных. Анестезия была проведена с учетом этических норм раствором для инъекций «Новокаин» 0,5% (ООО НПП «Агрофарм», Россия).

Для гистологического исследования образцы тканей отбирали в ходе санации раневой поверхности при смене повязок на 8-е, 15-е и 21-е сутки эксперимента у всех животных в группе. Биоптаты получали из краевой зоны раневой поверхности, включая прилегающие неизмененные ткани, стандартизированным методом.

Образцы тканей погружали в 10%-ный забуференный нейтральный формалин («ХимРеактив», г. Екатеринбург, Россия) на 3 суток. На 4-е сутки промывали в проточной воде в течение двух часов, помещали в изопропиловый спирт с последующей проводкой по парафинам, заключали образцы в парафиновые блоки на специализированную кассету («БиоВитрум», Россия). Гистологические срезы толщиной 6 мкм изготавливали на микротоме. Окрашивали гематоксилином и эозином и по Ван Гизону («БиоВитрум», Россия). Полученные препараты просматривали в микроскопе «Ломо» (Россия) под увеличением x10, x40, x90 и производили фотосъемку видеоокуляром «Микромед Эврика» («Микромед», Россия).

После нанесения раны самки кроликов-гибридов были разделены на две группы по пять особей. В первой (контрольной) группе для лечения применяли ранозаживляющее покрытие на основе коллаген-хитозанового комплекса «Коллахит-ФА» («Коллахит» ООО, Россия). Раневая повязка содержит коллаген и хитозан, обладает рядом уникальных свойств, включающих гомеостатический эффект и антибактериальный, и способствует поддержанию влажной среды в раневом поле, что благоприятно влияет на процессы заживления. В результате рана становится сухой и чистой, что позволяет производить перевязки легко и безболезненно.

¹ Рекомендация Коллегии ЕЭК от 14.11.2023 № 33 «О руководстве по работе с лабораторными (экспериментальными) животными при проведении доклинических (неклинических) исследований».

Во второй (опытной) группе к этому же покрытию добавляли ультразвуковую стимуляцию с использованием аппарата «Ретон-АУТн-01» (НПО «Ретон», Россия). Действие прибора основано на использовании низкочастотных ультразвуковых волн, которые проникают в глубокие слои тканей. При комбинации с раневой повязкой наблюдается эффект ультразвукового фонофореза, способствующего трансдермальному транспорту лекарственных веществ из повязки в нижележащие ткани. Стимуляцию ультразвуком проводили в течение 1 мин. в сутки при смене раневого покрытия. Раневую повязку меняли каждые 3 суток.

Методология исследования включала морфометрические, макроскопические и гистологические методы.

Для морфометрических исследований измеряли площадь раны у всех особей в обеих группах в течение 28 суток (до полного заживления раневой поверхности), перенося ее контуры на плотную полиэтиленовую пленку, что позволило количественно оценить степень заживления. Пленки с контурами ран подвергали оцифровке и подсчету площади при помощи программы Aitami studio (ООО «Альтами», Россия). Для достоверности измерения проводили калибровку каждого оцифрованного изображения относительно стандартной линейки.

Полученные морфометрические данные анализировали с использованием программы Excel (США), а для оценки достоверности использовали Т-критерий Стьюдента ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В 1-е сутки после нанесения поверхностных ран на кожный покров кроликов наблюдали гиперемию и экссудативные выделения. Общее состояние животных оставалось в пределах физиологической нормы. К 4-м суткам в обеих группах отмечали отечность тканей, гиперемию, а раневое пространство было покрыто бледно-желтым экссудатом.

На 8-е сутки у животных контрольной группы наблюдали признаки активного воспалительного процесса: сохраняющуюся влажность раневых поверхностей, интенсивно-красный цвет, частично сформированный струп и выраженную болевую реакцию при пальпации. Эти признаки указывают на замедленное течение репаративных процессов. В отличие от них, у животных опытной группы клиническая картина была более благоприятной: отмечалось формирование обильного струпа, что свидетельствует о переходе воспалительной фазы в фазу пролиферации и начале активной эпителизации. Отсутствие болевой реакции при пальпации подтверждало снижение воспалительной активности.

На микроскопическом уровне на 8-е сутки наблюдали различные процессы восстановления. В контрольной группе гистологическая картина

была неоднородной: грануляционная ткань, состоящая из бластных мезенхимальных клеток, таких как фибробласты и зачатки кровеносных сосудов, что свидетельствует о начале регенерации, отмечаются обширные участки фиброзно-некротических масс и выраженная лейкоцитарная инфильтрация (рис. 1), что подтверждает данные клинического наблюдения о персистенции острой воспалительной реакции и объясняет замедленное течение заживления.

В опытной группе наблюдали признаки более активного и организованного процесса регенерации. Отмечали четкие зачатки слоев эпителиальных клеток по краям раны. Раневое пространство было покрыто струпом, состоящим из некротизированных клеток и фибрина, который выполнял защитную функцию. Под струпом отмечали развитую грануляционную ткань с многочисленными фибробластами, что указывает на активное течение пролиферативной фазы (рис. 2).

На 15-е сутки установлены существенные различия в характере репаративных.

У животных контрольной группы сохранены признаки хронического воспаления и замедленного течения заживления: частичное покрытие раны струпом с наличием под ним серозно-гнойного экссудата, болезненность при пальпации. В опытной группе зарегистрировано активное заживление: раневое пространство заполнено мелкозернистыми розовыми грануляциями, что указывает на активное формирование зрелой

Рис. 1. Микроструктура заживления поверхностной раны на 8-е сутки — контрольная группа (окраска по Ван Гизону), ув. $\times 100$: а — струп; б — эпителий; в — грануляционная ткань

Fig. 1. Microstructure of healing of a superficial wound on the 8th day — control group (Van Gieson staining), increased $\times 100$: a — scab; b — epithelium; c — granulation tissue

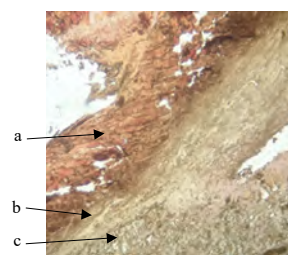
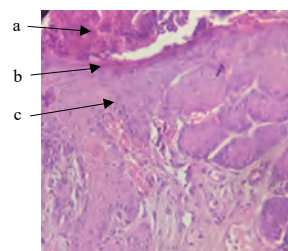


Рис. 2. Микроструктура заживления поверхностной раны на 8-е сутки — опытная группа (окраска — гематоксилин и эозин), ув. $\times 100$: а — струп; б — эпителий; в — грануляционная ткань

Fig. 2. Microstructure of healing of a superficial wound on the 8th day — experimental group (staining — hematoxylin and eosin), increased $\times 100$: a — scab; b — epithelium; c — granulation tissue



соединительной ткани. Наблюдается краевая эпителизация. Эти признаки свидетельствуют о завершении воспалительной фазы и переходе к заключительному этапу заживления — реконструкции тканей.

Микроструктурные изменения, наблюдаемые на 15-е сутки в контрольной группе, отмечали: формирование молодого эпителия, сосуды в сосочковом слое, единичные фибробласты, что говорит о формировании соединительной ткани, зачатки коллагеновых волокон (это говорит о начале процесса формирования внеклеточного матрикса) (рис. 3).

В опытной группе эпителиальный слой активно пролиферирует в грануляционную ткань, которая начинает приобретать более плотную структуру, схожую с волокнистой соединительной тканью. Вертикальные сосудистые структуры не наблюдались, коллагеновые волокна плотные, формируют выросты в грануляционной ткани, что говорит об активной пролиферации клеток (рис. 4).

На 21-е сутки в контрольной группе раневые поверхности сохранили неровные очертания, заполнены грануляционной тканью, при этом продолжается процесс краевой эпителизации. Такие характеристики свидетельствуют о неполной реконструкции кожного покрова и указывают на замедленное течение завершающей фазы заживления — ремоделирования тканей. Наличие неровных краев и незрелых грануляций может указывать на формирование нестабильного эпителия, подверженного риску повторного травмирования и осложнений, особенно при воздействии внешних факторов.

В опытной группе — полное завершение эпителизации, что указывает на полноценное восстановление структур кожного покрова. Наличие роста шерстного покрова в области экспериментальной раны является маркером восстановления функции кожи и окончательного завершения репаративного процесса.

Микроструктурные изменения в контрольной и опытной группах на 21-е сутки указывают на значительные различия в состоянии эпителиального слоя кожи и сопутствующих структур.

В контрольной группе наблюдаются признаки незрелости эпителия: неровная базальная мембрана, продолжающееся формирование грануляционной ткани, единичные зачатки придатков (рис. 5).

В опытной группе эпителий полностью сформирован и представлен зрелыми клетками. Наличие плотных и упорядоченных пучков коллагеновых волокон, волосных фолликулов и сальных желез указывает на завершение ремоделирования и восстановление функциональной структуры кожи (рис. 6).

Морфометрические данные по эксперименту были сведены в таблицу, сформированы в гистограмму и демонстрируют динамику сокращения площади раны (рис. 7).

Рис. 3. Микроструктура заживления поверхностной раны на 15-е сутки — контрольная группа (окраска — гематоксилин и эозин), ув. $\times 100$: а — эпителий; б — коллагеновые волокна; в — сосуд

Fig. 3. Microstructure of healing of a superficial wound on the 15th day — control group (staining — hematoxylin and eosin), increased $\times 100$: a — epithelium; b — collagen fibers; c — vessel

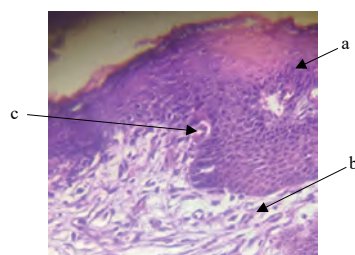


Рис. 4. Микроструктура заживления поверхностной раны на 15-е сутки — опытная группа (окраска по Ван Гизону), ув. $\times 100$: а — эпителий; б — коллагеновые волокна; в — сосуд

Fig. 4. Microstructure of healing of a superficial wound on the 15th day — experimental group (Van Gieson staining), increased $\times 100$: a — epithelium; b — collagen fibers; c — vessel

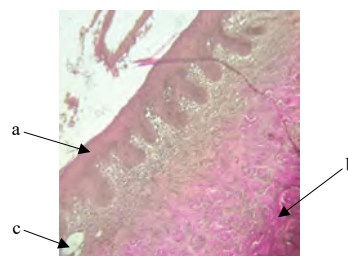


Рис. 5. Микроструктура заживления поверхностной раны на 21-е сутки — контрольная группа (окраска — гематоксилин и эозин), ув. $\times 400$: а — эпителий; б — грануляционная ткань; в — зачатки желез; г — коллагеновые волокна

Fig. 5. Microstructure of healing of a superficial wound on the 21st day — control group (staining — hematoxylin and eosin), increased $\times 400$: a — epithelium; b — granulation tissue; c — rudiments of glands; d — collagen fibers

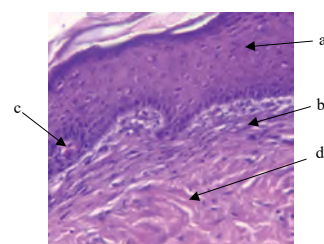


Рис. 6. Микроструктура заживления поверхностной раны на 21-е сутки — опытная группа (окраска по Ван Гизону), ув. $\times 400$: а — эпителий; б — грануляционная ткань; в — зачатки фолликулов и желез

Fig. 6. Microstructure of healing of a superficial wound on the 21st day — experimental group (Van Gieson staining), increased $\times 400$: a — epithelium; b — granulation tissue; c — rudiments of follicles and glands



Морфометрические данные демонстрируют успешность лечения ран в обеих группах, однако использование ультразвуковой стимуляции в сочетании с ранозаживляющим покрытием «Коллахит-ФА» показало более эффективные результаты.

На 7-е сутки в контрольной группе наблюдали лишь 10,6% заживления раны, в то время как в опытной группе этот показатель составил 11,3%. Однако к 19-м суткам разница в заживлении стала более значимой: в контрольной группе площадь раны составила $10,9 \pm 0,15$ см², что равняется 54,6% сокращения, тогда как в опытной — $9,02 \pm 0,19$ см², что составляет 62,1% уменьшения.

Статистический анализ ($p < 0,05$) демонстрирует, что результаты во второй группе имеют статистически значимую разницу по сравнению с первой.

На 28-е сутки раневая поверхность в контрольной группе сократилась на 77% ($p < 0,05$) от исходного значения, тогда как в опытной группе составила лишь $3,86 \pm 0,23$ см², что соответствует 83,8% ($p < 0,05$) заживления. Это подтверждает эффективность добавления ультразвуковой стимуляции в лечение.

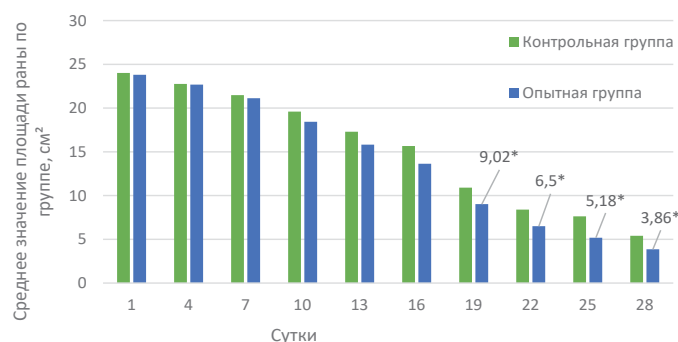
Выводы/Conclusions

В результате исследования установлено, что комбинированное применение раневого покрытия «Коллахит-ФА» и низкочастотной ультразвуковой стимуляции обеспечивает выраженный положительный эффект в лечении поверхностных ран у кроликов. Статистический анализ морфометрических данных выявил достоверное ($p < 0,05$) ускорение репаративных процессов: к 28-м суткам эксперимента в опытной группе достигнуто 83,8% сокращения площади раневой поверхности, что на 8,8% превышает показатели контрольной группы.

Клинические наблюдения продемонстрировали различия в динамике заживления. В опытной группе отмечено сокращение воспалительной фазы к 8-м суткам с последующим активным переходом к пролиферации и ремоделированию тканей, в то время как в контрольной группе

Рис. 7. Динамика заживления поверхностной раны, * $p < 0,05$

Fig. 7. Dynamics of the healing area of a superficial wound, * $p < 0.05$



сохранялись признаки персистирующего воспаления до 15-х суток эксперимента.

Гистологический анализ подтвердил формирование полноценного регенерата в опытной группе, характеризующегося организованной структурой грануляционной ткани с интенсивным ангиогенезом, активным фиброгенезом с образованием ориентированных пучков коллагеновых волокон, полной эпителизацией с восстановлением базальной мембраны и дифференцировкой придатков кожи к 21-м суткам.

Особую значимость представляет восстановление функциональных структур кожи — формирование волосных фолликулов и сальных желез, что свидетельствует о полноценной регенерации, а не просто рубцевании раневого дефекта. Комплексное действие методики обеспечивается сочетанием свойств коллаген-хитозанового комплекса, создающего оптимальные условия для репарации, и физического воздействия ультразвука, потенцирующего клеточную активность и транспорт биологически активных веществ.

Полученные результаты позволяют рекомендовать комбинированную методику с применением покрытия «Коллахит-ФА» и ультразвуковой стимуляции для широкого использования в ветеринарной практике при лечении ран различной этиологии. Перспективные направления дальнейших исследований — изучение молекулярных механизмов взаимодействия компонентов терапии и адаптация методики для других видов сельскохозяйственных и домашних животных.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Винник Ю.С., Якимов С.В., Тепляков Е.Ю., Жабрович О.А. Применение раневых покрытий на основе коллаген-хитозанового комплекса в местном лечении длительно незаживающих ран. *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. 2004; 49(8): 35–37. <https://www.elibrary.ru/nxndgb>
- Черненко В.В., Черненко Ю.Н. Динамика показателей крови при раневом процессе у кроликов. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2023; (2): 203–206. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-100-2-203-206>

REFERENCES

- Vinnik Yu.S., Yakimov S.V., Teplyakov E.Yu., Zhabrovich O.A. Application of collagen-chitosan covers in the local treatment for non-healing wounds. *Siberian Medical Journal (Irkutsk)*. 2004; 49(8): 35–37 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/nxndgb>
- Chernenok V.V., Chernenok Yu.N. Dynamics of blood parameters during wound healing in rabbits. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023; (2): 203–206 (in Russian). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-100-2-203-206>

3. Петрова М.Б., Мохов Е.М., Сергеев А.Н., Серов Е.В. Экспериментально-гистологический анализ влияния биологически активных шовных материалов на течение раневого процесса в коже. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; (6): 300. <https://www.elibrary.ru/vjptzp>
4. Бесчастнов В.В. и др. Оценка возможности использования коммерческих раневых покрытий в качестве матрицы-носителя бактериофагов. *Современные технологии в медицине*. 2024; 16(1): 45–53. <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.1.05>
5. Бесчастнов В.В. и др. Можно ли использовать раневые покрытия в качестве носителей бактериофагов и лактобактерий? Исследование *in vitro*. *Раны и раневые инфекции. Журнал им. проф. Б.М. Костюченко*. 2023; 10(3): 22–32. <https://doi.org/10.52419/2408-9613-2023-10-3-22-32>
6. Золотухина В.А., Безрук Е.Л. Характеристика эндотоксемии при разных способах лечения экспериментальных ожогов у крыс. *Международный вестник ветеринарии*. 2022; (4): 440–444. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.440>
7. Кириченко А.К., Большаков И.Н., Али-Риза А.Э., Власов А.А. Морфологический анализ заживления ожоговой раны при применении коллаген-хитозанового раневого покрытия. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2012; 154(11): 652–656. <https://www.elibrary.ru/pgyzkt>
8. Сабельников В.В., Сабельникова Т.М., Горячева В.Н. Исследование механизма подавления бактериальной микрофлоры низкочастотным ультразвуком. *Наукоёмкие технологии*. 2021; 22(6): 37–45. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202106-04>
9. Черненко В.В., Черненко Ю.Н. Лечение гнойных ран у кроликов мазью на коллагеновой основе. *Вестник Брянской ГСХА*. 2021; (4): 64–68. <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-86-4-64-68>
10. Кутявин К.С., Хайдаршин Б.С. Перевязочные материалы, модифицированные антибиотиком и протеолитическими ферментами. *LI итоговая студенческая научная конференция Удмуртского государственного университета. Материалы Всероссийской конференции*. Ижевск: Удмуртский государственный университет. 2024; 122–123. <https://www.elibrary.ru/bprmttd>
11. Дымникова Н.С., Морыганов А.П., Киселев М.Г. Многофункциональные нетканые материалы для инновационных перевязочных средств. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2023; 3(405): 138–143. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_3_138
12. Ефанов С.А., Кудрявцева Т.Н., Григорьян А.Ю., Кузнецов Д.Н., Климова Л.Г., Кометиани И.Б. Исследование индикаторных свойств и биологической активности целлюлозных перевязочных материалов, окрашенных галохромными азопроизводными стилибенового ряда. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2023; 6(408): 91–99. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_6_91
13. Кутявин К.С. Перевязочные материалы нового поколения. *LI итоговая студенческая научная конференция Удмуртского государственного университета. Материалы Всероссийской конференции*. Ижевск: Удмуртский государственный университет. 2023; 55–57. <https://www.elibrary.ru/jvypxs>
14. Карапетян Г.Э., Пахомова Р.А., Кочетова Л.В., Петрушко С.И. Применение озонотерапии, ультразвука и криотерапии в лечении инфицированных и гнойных ран на фоне хронической венозной недостаточности. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2023; 20(2): 131–136. <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2023-20-2-131-136>
15. Maresca D. et al. Biomolecular Ultrasound and Sonogenetics. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2018; 9: 229–252. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060817-084034>
16. Gokulakrishnan M., Sabarish Babu M.S., Nagarajan L., Shafiuzama M., D'Souza N.J. Management of Large Chronic Non-healing Wounds by Autogenous Platelet Rich Plasma and Reconstructive Surgery in Three Cats. *Iranian Journal of Veterinary Surgery*. 2016; 11(2): 61–66.
17. Морозов А.М., Муравлянцева М.М., Минакова Ю.Е., Аскеров Э.М., Кадиков В.А., Жуков С.В. Возможность использования физиотерапии в практике хирурга. Обзор литературы. *Хирург*. 2021; (11–12): 63–78. <https://doi.org/10.33920/med-15-2106-06>
18. Pires-de-Campos M.S.M., De Almeida J., Wolf-Nunes V., Souza-Francesconi E., Grassi-Kassisse D.M. Ultrasound associated with caffeine increases basal and beta-adrenoceptor response in adipocytes isolated from subcutaneous adipose tissue in pigs. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*. 2016; 18(2): 116–123. <https://doi.org/10.3109/14764172.2015.1063659>
3. Petrova M.B., Mokhov E.M., Sergeev A.N., Serov E.V. Experimental histological analysis of the effect of biologically active suture materials for the skin wound healing. *Modern problems of science and education*. 2015; (6): 300 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/vjptzp>
4. Beschastnov V.V. et al. Evaluation of the Feasibility of Using Commercial Wound Coatings as a Carrier Matrix for Bacteriophages. *Modern Technologies in Medicine*. 2024; 16(1): 45–52. <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.1.05>
5. Beschastnov V.V. et al. Is it possible to use wound dressings as carriers of bacteriophages and lactobacilli? *in vitro* study. *Wounds and wound infections. The prof. B.M. Kostyuchenok journal*. 2023; 10(3): 22–32 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/2408-9613-2023-10-3-22-32>
6. Zolotukhina V.A., Bezruk E.L. Characteristics of endotoxemia in different ways of treatment of experimental burn in rats. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2022; (4): 440–444 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.4.440>
7. Kirichenko A.K., Ali-Rizal A.E., Bolshakov I.N., Vlasov A.A. Morphological Study of Burn Wound Healing with the Use of Collagen-Chitosan Wound Dressing. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2013; 154(5): 692–696. <https://doi.org/10.1007/s10517-013-2031-6>
8. Sabelnikov V.V., Sabelnikova T.M., Goryacheva V.N. Investigation of the suppression mechanism for bacterial microflora by low frequency ultrasound. *Science Intensive Technologies*. 2021; 22(6): 37–45 (in Russian). <https://doi.org/10.18127/j19998465-202106-04>
9. Chernenok V.V., Chernenok Yu.N. Treatment of rabbits with purulent wounds with collagen-based ointment. *Vestnik Bryansk State Agricultural Academy*. 2021; (4): 64–68 (in Russian). <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-86-4-64-68>
10. Kutyavin K.S., Khaidarshin B.S. Dressings modified with antibiotics and proteolytic enzymes. *LI final student scientific conference of Udmurt State University. Proceedings of the All-Russian conference*. Izhevsk: Udmurt State University. 2024; 122–123 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/bprmttd>
11. Dymnikova N.S., Moryganov A.P., Kiselev M.G. Multifunctional nonwoven materials for innovative dressings. News of higher educational institutions. *Technology of textile industry (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti)*. 2023; 3(405): 138–143 (in Russian). https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_3_138
12. Efanov S.A., Kudryavtseva T.N., Grigoryan A.Yu., Kuznetsov D.N., Klimova L.G., Kometiani I.B. Study of indicator properties and biological activity of cellulose dressings dyed with halochromic azo derivatives of stilbene series. News of higher educational institutions. *Technology of textile industry (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti)*. 2023; 6(408): 91–99 (in Russian). https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_6_91
13. Kutyavin K.S. New generation dressings. *LI final student scientific conference of the Udmurt State University. Proceedings of the All-Russian conference*. Izhevsk: Udmurt State University. 2023; 55–57 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/jvypxs>
14. Karapetyan G.E., Pakhomova R.A., Kochetova L.V., Petrushko S.I. Clinical application of ozone therapy, ultrasound and cryotherapy in the treatment of infected and purulent wounds on the background of chronic venous insufficiency. *Journal of Volgograd State Medical University*. 2023; 20(2): 131–136 (in Russian). <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2023-20-2-131-136>
15. Maresca D. et al. Biomolecular Ultrasound and Sonogenetics. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2018; 9: 229–252. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060817-084034>
16. Gokulakrishnan M., Sabarish Babu M.S., Nagarajan L., Shafiuzama M., D'Souza N.J. Management of Large Chronic Non-healing Wounds by Autogenous Platelet Rich Plasma and Reconstructive Surgery in Three Cats. *Iranian Journal of Veterinary Surgery*. 2016; 11(2): 61–66.
17. Morozov A.M., Muravlyantseva M.M., Minakova Yu.E., Askerov E.M., Kadykov V.A., Zhukov S.V. About the possibility of using physiotherapy in the practice of a surgeon. Literature review. *Surgeon*. 2021; (11–12): 63–78 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/med-15-2106-06>
18. Pires-de-Campos M.S.M., De Almeida J., Wolf-Nunes V., Souza-Francesconi E., Grassi-Kassisse D.M. Ultrasound associated with caffeine increases basal and beta-adrenoceptor response in adipocytes isolated from subcutaneous adipose tissue in pigs. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*. 2016; 18(2): 116–123. <https://doi.org/10.3109/14764172.2015.1063659>

19. Савченко Ю.П., Федосов С.Р. Методы определения размеров раневой поверхности. *Вестник хирургии им. И.И. Грекова*. 2007; 166(1): 102–105.
<https://www.elibrary.ru/ivsvfll>

20. Резник Л.Б. и др. Использование контактного низкочастотного ультразвукового воздействия в условиях чрескостного остеосинтеза при лечении открытых переломов костей голени. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2016; 36(2): 68–73.
<https://www.elibrary.ru/vxvyzp>

21. Kožár M., Staroňová R., Šišková B. The Efficiency of the Natural Collagen Coating in the Treatment of Extensive Chronic Defects of the Skin and Surrounding Tissues in Dogs. *Folia Veterinaria*. 2022; 66(4): 67–74.
<https://doi.org/10.2478/fv-2022-0039>

ОБ АВТОРЕ

Никита Анатольевич Чув

аспирант

<https://orcid.org/0009-0003-8237-3360>

ivachka.2016@mail.ru

Красноярский государственный аграрный университет,
 пр. Мира, 90, Красноярск, 60049, Россия

19. Savchenko Yu.P., Fedosov S.R. Methods of determination of sizes of the wound surface. *Grekov's Bulletin of Surgery*. 2007; 166(1): 102–105 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/ivsvfll>

20. Reznik L.B. et al. The use of contact low-frequency ultrasonic exposure under conditions of transosseous osteosynthesis at the treatment of open tibial fractures. *Siberian Scientific Medical Journal*. 2016; 36(2): 68–73 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/vxvyzp>

21. Kožár M., Staroňová R., Šišková B. The Efficiency of the Natural Collagen Coating in the Treatment of Extensive Chronic Defects of the Skin and Surrounding Tissues in Dogs. *Folia Veterinaria*. 2022; 66(4): 67–74.
<https://doi.org/10.2478/fv-2022-0039>

ABOUT THE AUTHOR

Nikita Anatolyevich Chuev

Graduate Student

<https://orcid.org/0009-0003-8237-3360>

ivachka.2016@mail.ru

Krasnoyarsk State Agrarian University,
 90 Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia



ПЛОДЫ И ЯГОДЫ
 VII СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ФОРУМ

VII СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА ПЛОДЫ И ЯГОДЫ РОССИИ 2025

30–31 ОКТЯБРЯ 2025 г. / СОЧИ

АГРО БИЗНЕС

Организатор форума

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ:

- Новые направления в отрасли садоводства и виноградарства
- Перспективы отрасли плодородства и виноградарства
- Технологии хранения и предпродажной подготовки фруктов и ягод
- Инфраструктура сбыта плодов и ягод. Как реализовать?
- Переговоры с сетями
- Государственная поддержка развития плодово-ягодной отрасли

АУДИТОРИЯ ФОРУМА

Предприятия фруктового садоводства, виноградарства и ягодоводства; Компании, производящие удобрения; Предприятия по переработке и хранению плодово-овощной продукции; Крестьянские фермерские хозяйства, выращивающие плодово-ягодные культуры открытого грунта; Крупнейшие агропарки и оптово-распределительные центры; Представители крупнейших торговых сетей; Госорганы; Представители профильных ассоциаций и союзов.

По вопросам участия:

+7 (909) 450-36-10

+7 (960) 476-53-39

+7 (968) 800-53-39

e-mail: events@agbz.ru

Регистрация на сайте: fruitforum.ru



Севастьянова Т.В.¹ ✉Уша Б.В.²Носков С.Б.³Альшевская А.А.⁴

¹Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности, г. о. 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: 06.08.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© 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 urban district, Moscow region, Russia

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

³Belgorod State Agricultural University named after V. 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: 06.08.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

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

Эффективность влияния таргетных комплексных пробиотиков на производственные показатели сельскохозяйственных животных

РЕЗЮМЕ

В статье приведены результаты исследований разработанных функциональных кормовых добавок целевого назначения для профилактики болезней животных, сохранения микробиоты сельскохозяйственных животных, улучшения качественных показателей мяса и молока, повышения продуктивности сельскохозяйственных животных. Одним из эффективных путей совершенствования промышленной технологии в направлении обеспечения нормального физиологического статуса, нормализации физиологических процессов, повышения продуктивности животных является применение инновационных форм функциональных пробиотических кормовых добавок, представляющих собой бактериальные формулы из консорциума живых микробных культур, сорбированных на высокодисперсном кремнеземе и биологически активных компонентов — экстракта и шрота расторопши пятнистой. В работе освещены результаты применения таргетных кормовых добавок в скотоводстве и свиноводстве и их влияния на интенсивность роста, показатели молочной продуктивности, показатели качества и химический состав мяса и молока.

Живая масса в опытных группах телят была на 4,7% и 3,8% выше по сравнению с контрольной, во второй опытной по сравнению с первой — на 0,9%, а живая масса молодняка свиней в опытных группах составила $99,83 \pm 0,13$ кг и $101,19 \pm 0,12$ кг, что на 3,5% и 4,9% больше аналогичного показателя в контрольной группе. Кормовые добавки «Биопротектин КД порошок» и «Биопротектин КД гранулы» влияют на показатели выхода туши опытных групп, которые преобладали над показателями контрольных групп, а мясо характеризовалось оптимальным соотношением жира и белка.

Ключевые слова: таргетные пробиотики, функциональные кормовые добавки, гепатопротекторы, мясо, молоко, химический состав мяса, химический состав молока

Для цитирования: Севастьянова Т.В., Уша Б.В., Носков С.Б., Альшевская А.А. Эффективность влияния таргетных комплексных пробиотиков на производственные показатели сельскохозяйственных животных. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 32–44. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-32-44>

The effectiveness of targeted complex probiotics in improving the performance of farm animals

ABSTRACT

The article presents the results of research on developed targeted functional feed additives for the prevention of animal diseases, preservation of agricultural animal microbiota, improvement of quality indicators of meat and milk, and increasing the productivity of agricultural animals. One of the effective ways to improve industrial technology in the direction of ensuring a normal physiological status, normalizing physiological processes, and increasing animal productivity is the use of innovative forms of functional probiotic feed additives, which are bacterial formulas from a consortium of live microbial cultures, sorbed on highly dispersed silica and biologically active components — extract and meal of milk thistle (*Silybum marianum*). The work highlights the results of the application of targeted feed additives in cattle and pig farming and their influence on the growth intensity, milk productivity indicators, quality indicators, and chemical composition of meat and milk.

The live weight in the experimental groups of calves was 4.7% and 3.8% higher compared to the control, in the second experimental compared to the first — by 0.9%, and the live weight of young pigs in the experimental groups was 99.83 ± 0.13 kg and 101.19 ± 0.12 kg, which is 3.5% and 4.9% more than the analogous indicator in the control group. The feed additives “Bioprotectin KD powder” and “Bioprotectin KD granules” also influence the indicators for the carcass yield of the experimental groups, which prevailed over the indicators of the control groups, and the meat was characterized by an optimal ratio of fat and protein.

Key words: targeted probiotics, functional feed additives, hepatoprotectors, meat, milk, chemical composition of meat, chemical composition of milk

For citation: Sevastyanova T.V., Usha B.V., Noskov S.B., Alshevskaya A.A. The effectiveness of targeted complex probiotics in improving the performance of farm animals. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 32–44 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-32-44>

Введение/Introduction

Согласно совместному докладу Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО¹), к 2034 году мировое потребление мяса вырастет на 47,9 млн т и достигнет 406 млн т, что создаст новые вызовы и возможности для продовольственной отрасли, при этом 55% придется на страны Азии, включая Китай, Индию и Вьетнам, которые уже увеличивают производственные мощности, активно внедряя современные технологии в сельское хозяйство.

Однако в условиях интенсивного роста животноводческой отрасли производителям мяса необходимо быстро адаптироваться к новым стандартам устойчивого развития [1] и благополучия животных [2], ведь именно от этого зависит продовольственная безопасность страны [3–5].

По данным за 2025 год ассоциации «Объединенных мясопереработчиков», за последние годы общий объем производства мяса во всех формах хозяйствования увеличивается в среднем на 3%. Прирост объема производства мяса составляет около 4%, и, конечно же, основными драйверами роста общего объема производства мяса (по показателям 2024 г.) являются свинина (доля превышает 40%, прирост 5%) и говядина (доля 8%, прирост 7%). При этом прирост производства говядины имеет место на фоне резкого сокращения поголовья КРС — на 800 тыс. голов².

Рынок мяса в России является одним из ключевых сегментов агропромышленного комплекса страны и играет важную роль как в обеспечении продовольственной безопасности, так и в экономике в целом. За последние 6 лет, несмотря на рост производства, физический объем потребления свежего мяса снизился на 12,3%, а среднегодовая динамика (CAGR 2019–2024 гг.) составила 2,6%. При этом, по данным Центра экономики рынков, динамика потребления свежего мяса (начиная с 2023 года) перешла в позитивный прогноз относительно спада в 2002 году — на 8,5%. В расчете на душу населения страны потребление свежего мяса за последние шесть лет снизилось на 11,2% — с 29,4 кг/чел в 2019 году до 26,1 кг/чел в 2024-м. Среднегодовое снижение подушевого потребления свежего мяса в России (CAGR 2019–2024 гг.) составило 2,4%³.

В России самым популярным видом свежего мяса является птица: 2024 году на данный сегмент приходилось 37% физического объема потребления, выраженного в килограммах, что меньше на 3% в сравнении с 2019 годом (40%), а доля потребления свинины в структуре п продуктов

питания в 2024 году увеличилась на 2% в сравнении с 2019 годом (24%).

Говоря о продукции животного происхождения, в первую очередь стоит отметить качество и безопасность, отмечая, что пищевая безопасность — одно из ключевых требований к сырью, обеспечивающему гарантию безопасности продуктов питания [6–8].

Животноводство — многосегментарная отрасль сельского хозяйства, уровень развития которой определяется степенью насыщения рынка животноводческим сырьем и продукцией животного происхождения. Важнейшими сегментами отраслями являются молочно-мясное скотоводство, свиноводство, коневодство, овцеводство и птицеводство.

По данным Росстата⁴, российские хозяйства всех категорий (сельхозорганизации, фермеры, личные подсобные хозяйства) в 2024 году произвели 16,9 млн т скота и птицы (в живом весе, на убой), что на 2,1% больше, чем в 2023 году.

При этом на начало 2025 года общий объем поголовья крупного рогатого скота на территории Российской Федерации насчитывает 16 377,5 тыс. голов, из них коровы составляют 7261,5, свиньи — 27 824,6 тыс. голов, а лошади — 195,0 тыс. голов. При этом лидерами по скотоводству являются сельскохозяйственные организации Центрального федерального округа, второе место занимает Приволжский федеральный округ, третье — Сибирский федеральный округ (табл. 1, 2).

Скотоводство — наиболее сложный, но очень важный сегмент животноводства. Разведение и содержание крупного рогатого скота всегда считались основой отрасли животноводства [9–11]. Общее увеличение объемов производства скота способствовало повышению обеспеченности мясом населения страны на душу населения [12–14].

По уровню продуктивности коров молочно-го направления Российская Федерация находится на 10-м месте в мире — 5000 кг молока, незначительно уступая Республике Беларусь и Китаю⁵. Повышение удоев является одной из главных целей Федеральной научно-технической программы «Улучшение генетического потенциала крупного рогатого скота молочных пород»⁶. Программой

Таблица 1. Поголовье сельскохозяйственных животных с 2021 по 2024 г.⁷

Table 1. Number of farm animals from 2021 to 2024

Сельскохозяйственные животные	Поголовье, тыс. гол.				
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
1 КРС	18 055,4	17 657,6	17 485,0	17 109,5	16 377,5
1.1. Коровы	7894,9	7746,4	7719,2	7550,4	7261,5
2 Лошади	242,6	227,4	219,2	208,7	195
3 Свиньи	25 855,4	26 239,1	27 700,1	28 208,4	27 824,6

¹ <https://www.fao.org/newsroom/detail/oecd-fao-agricultural-outlook--emerging-economies-will-continue-driving-agricultural-markets/ru>

² https://asomp.ru/news/rossiiskii_myasnoi_rynok_itogi_2024_goda?ysclid=mg7ma6gvm4684731479

³ <https://research-center.ru/rynok-svezhego-mjasa-v-rossii-v-2024-godu/?ysclid=mg7mjvf4eu896431416>

⁴ <http://rosstat.gov.ru/>

⁵ https://asomp.ru/news/rossiiskii_myasnoi_rynok_itogi_2024_goda?ysclid=mg7ma6gvm4684731479

⁶ <https://fntp-mcx.ru/subprogramms/milk?ysclid=mg7narzt3n11921492>

⁷ <https://bi.gks.ru/biportal/?solution=Dashboard&allsol=1>

Таблица 2. Объем поголовья животных в сельскохозяйственных организациях на территории федеральных округов Российской Федерации в январе 2025 года⁸

Table 2. Number of animals in agricultural organizations in the federal districts of the Russian Federation in January 2025

Субъект РФ	Крупный рогатый скот, тыс. гол.	Коровы, тыс. гол.	Свины, тыс. гол.	Лошади, тыс. гол.
Российская Федерация	7446,3	3023,8	26 156,6	195,0
Центральный федеральный округ	2316,6	910,2	15 300,1	7,4
Северо-Западный федеральный округ	558,0	259,3	2274,1	1,2
Южный федеральный округ	576,0	216,0	1059,0	9,9
Северо-Кавказский федеральный округ	246,3	119,5	235,6	21,3
Приволжский федеральный округ	2259,7	897,9	3854,5	43,9
Уральский федеральный округ	379,2	159,7	1167,2	7,1
Сибирский федеральный округ	972,1	396,1	1719,3	58,5
Дальневосточный федеральный округ	138,4	65,2	546,7	45,9

предусмотрены развитие отечественной племенной базы, внедрение и разработка новых технологий кормления и содержания животных, создание новых типов и пород, что является индикатором эффективности молочного скотоводства в целом.

Основное поголовье и, как следствие, большая часть произведенного молока сосредоточены в крупных сельскохозяйственных организациях. Бонитировкой охвачены 25 пород из 71 региона Российской Федерации.

По данным «Интерфакса» за 2025 г., молочная отрасль в 2024 году увеличила надой молока на 0,8% — до 34,1 млн т. По данным Росстата, производство скота в сельхозорганизациях в 2024 году составило 13,8 млн т (на 3,3% больше 2023 г.), молока — 20,7 млн т (на 3,1% больше 2023 г.). Фермерские хозяйства и индивидуальные предприниматели в 2024 году произвели 0,6 млн т скота и птицы, что на 1,3% больше, чем в 2023 году. При этом личные подсобные хозяйства населения вырастили 2,5 млн т скота, что на 3,5% меньше, чем годом ранее. Надой молока снизили на 2,6% — до 10,4 млн т⁹.

Свиноводство — более эффективная, чем скотоводство, отрасль животноводства.

По данным издательства «Ведомости»¹⁰ (Россия), в структуре перерабатываемых сельскохозяйственных животных в Российской Федерации 28% приходится на долю свиней. Увеличение потребления свинины, как внутри страны, так и на экспорт, стимулирует развитие отрасли и увеличение ее доли в экономике. Это способствует

Рис. 1. Влияние пробиотических кормовых добавок на сельскохозяйственных животных

Fig. 1. Effect of Probiotic Feed Additives on Farm Animals



созданию новых рабочих мест, развитию малого и среднего бизнеса, а также росту экспортных доходов государства.

По прогнозу Национального союза свиноводов, к 2025 году объем производства свинины в России увеличится с 5,28 млн т в живом весе в 2022 году до 6,03 млн т. Так, за последние 8 лет (с 2015 по 2024 г.) ежегодное подушевое потребление мяса выросло на 13% и достигло 81 кг/чел в год, при этом потребление свинины — почти на 33% и достигло 30,9 кг/чел (38% от общего)¹¹.

При нарушении технологии кормления и содержания животных, при несбалансированных и неполноценных рационах, производственных стрессах, скученности поголовья нарушаются все обменные процессы в организме, в связи с чем происходят нарушение микрофлоры кишечника, снижение молочной продуктивности и естественной резистентности организма [15–17].

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что среди всех патологий сельскохозяйственных животных значительную нишу занимают болезни незаразной этиологии, при этом активно наблюдается увеличение патологий гастроинтестинальной и гепатобилиарной системы. Среди незаразных патологий сельскохозяйственных животных ведущее место отводят болезням молодняка, обусловленным нарушением технологий содержания и кормления, таким как токсическая дистрофия печени, алиментарная жировая дистрофия, гепатаргии различного генеза, приводящие к массовому падежу молодняка и причиняющие значительный экономический ущерб [18–20].

Одним из эффективных путей совершенствования промышленной технологии в направлении

⁸ <https://bi.gks.ru/biportal/?solution=Dashboard&allsol=1>

⁹ <https://www.interfax.ru/business/1004802>

¹⁰ <https://www.vedomosti.ru/>

¹¹ <https://agroexpert.press/products/ekspert-prognoziruet-rost-potrebleniya-myasa-v-rossii-do-rekordnyh-83-kg/?ysclid=mg7nfz64x7757589887>

обеспечения нормального физиологического статуса и высокой продуктивности животных является применение инновационных форм функциональных пробиотических кормовых добавок, представляющих собой бактериальные формулы из живых микробных культур и биологически активных компонентов [21, 22]. В рамках разработки новых поликомпонентных функциональных пробиотиков целевого назначения комбинируют комплексы пробиотических штаммов с сорбирующими веществами и пребиотиками природного происхождения [23–27].

В некоторых странах Европы и Америки, а также в Японии пробиотики (препараты, содержащие живые бактерии) в течение многих лет использовались в качестве лекарственных средств для нормализации работы кишечника и для лечения диареи и энтерита у человека. Принимая во внимание их эффективность, были созданы пробиотики для профилактики и лечения диареи и энтерита у домашних животных [28, 29].

В целях формирования общего подхода, направленного на рациональное применение антибиотиков, поиск альтернативных решений для профилактики инфекционных болезней, при сохранении возможности высокого уровня воспроизводства качественного сырья животного происхождения проведены аналитические исследования и изучена возможность применения функциональных пробиотиков целевого назначения [30–34]. При этом активными компонентами функциональных пробиотиков стали новые бактериальные штаммы, выделенные в природе и выбранные из-за их потенцированного действия на гастроинтестинальную и гепатобилиарную системы животных [35–40].

К прогрессивным формам препаратов нового поколения относятся сорбированные формы пробиотиков целевого назначения. Сорбированные пробиотики содержат бактерии, иммобилизованные на частицах твердого сорбента. За счет химических и электростатических сил взаимодействие таких форм со стенкой кишечника выше. Сорбент ускоряет дезинтоксикацию и репаративный процесс [41–43].

Цель данного исследования — комплексная оценка влияния новых функциональных пробиотических кормовых добавок «Биопротектин КД порошок» и «Биопротектин КД гранулы» на продуктивность, физиологическое состояние и качество продукции крупного рогатого скота и свиней.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Работу проводили с 2011 по 2025 г. в рамках научной тематики ФГБНУ ВНИИБП (FGGS-2022-0004) и научно-исследовательской деятельности докторантуры на кафедре внутренних незаразных болезней ФГБОУ ВО «Университет пищевых производств», ФГБУ ВГНКИ и ФГБУ «Белгородская МВЛ».

Все исследования проводили по общепринятым стандартизированным методикам.

Молочную продуктивность определяли по результатам контрольных доек по ГОСТ Р 57878¹².

Отбор проб молока и подготовку к исследованию проводили по ГОСТ 26809¹³.

Физико-химические исследования проб молока осуществляли методами по ГОСТ 25179¹⁴, ГОСТ Р ИСО 2446¹⁵. СОМО определяли по ГОСТ 54761¹⁶, плотность — по ГОСТ 3625¹⁷, влагу — по ГОСТ 3626¹⁸.

Оценку мясной продуктивности телят определяли методами прижизненной оценки (взвешиванием) и послеубойной оценки (убойная масса, убойный выход, морфологический состав туши в соотношении «жир — мышечные волокна») живых животных и их туш.

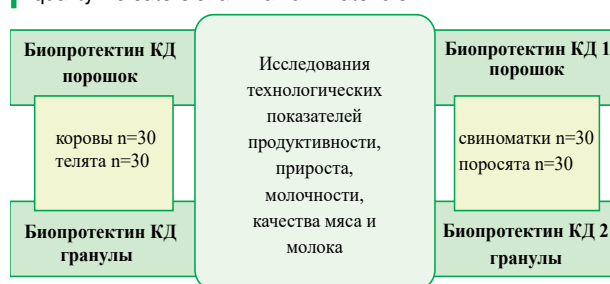
Определение массовой доли влаги проводили по ГОСТ Р 51479¹⁹, pH — методом ГОСТ Р 51478²⁰, а химический состав мяса — по ГОСТ 23392²¹.

Группы животных формировали по принципу групп-аналогов с учетом живой массы и физиологического состояния, что отражено на рисунке 2 и в таблице 3.

Кормление животных проводили одинаковыми по видовому и количественному составу кормов рационами²² в соответствии с установленными рецептурами кормления колхоза им. Фрунзе

Рис. 2. Блок-схема проведения исследований продуктивности и показателей качества сырья животного происхождения

Fig. 2. Block diagram of research on the productivity and quality indicators of animal raw materials



¹² ГОСТ Р 57878-2017 Методы определения параметров продуктивности крупного рогатого скота молочного и комбинированного направлений.

¹³ ГОСТ 26809-86 Молоко и молочная продукция. Правила приемки, методы отбора и подготовка проб к анализу.

¹⁴ ГОСТ 25179-90 Молоко. Методы определения белка.

¹⁵ ГОСТ Р ИСО 2446-2011 Молоко. Метод определения содержания жира.

¹⁶ ГОСТ 54761-2011 Молоко и молочные продукты методы определения массовой доли сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО).

¹⁷ ГОСТ 3625-84 Молоко и молочные продукты. Методы определения плотности.

¹⁸ ГОСТ 3626-73 Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги сухого вещества.

¹⁹ ГОСТ Р 51479-99 Мясо и мясные продукты. Определение влаги.

²⁰ ГОСТ Р 51478-99 Мясо и мясные продукты. Контрольный метод определения концентрации водородных ионов (pH).

²¹ ГОСТ 23392 2016 Методы химического и микроскопического анализа свежести.

²² 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

Белгородского района Белгородской области Российской Федерации. При этом животным опытных групп включали в состав рациона разработанные кормовые добавки «Биопротектин КД порошок» и «Биопротектин КД гранулы» в соответствии с расчетной формулой. Животные контрольной группы получали только основной рацион.

Исследования проводили на поголовье коров, телят бессоновского типа, созданного на базе племенного комплекса «Бессоновский», и на поголовье свиноматок и поросят 3-породного гибрида (крупная белая, ландрас и дюрок), созданного на базе племенного репродуктора «Чайки» колхоза им. Фрунзе Белгородского района Белгородской области Российской Федерации.

Манипуляции над животными соответствовали правилам этики работы с сельскохозяйственными и лабораторными животными²³ и законам²⁴ Российской Федерации.

«Биопротектин КД порошок» — кормовая добавка, в состав которой входит экстракт расторопши пятнистой (концентрированная форма флаволигнанов, прерывающих процесс перекисного окисления липидов), препятствует дальнейшему разрушению клеточных структур печени и стимулирует в поврежденных гепатоцитах синтез структурных и функциональных белков и фосфолипидов, ускоряет регенерацию клеток печени, обладает антиоксидантным действием, тормозящим проникновение в клетки печени различных токсинов; пребиотик и комплекс лакто- и бифидобактерий.

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

Статистическую обработку выполняли методами вариационной статистики с использованием пакетов Statistica 13.0 (StatSoft, Dell Software Company, США) и GraphPad Prism 9.0 (GraphPad Software Inc., США). Результаты представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего ($M \pm m$) при числе животных в группе $n = 5$.

Для оценки различий между тремя независимыми группами применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA²⁵).

Таблица 3. Схема проведения эксперимента

Table 3. Scheme of the experiment

Группы животных	Кормовой рацион	Норма ввода КД	Дни	Исзуаемые показатели
Коровы n = 30				
опыт 1-й	ОР + + «Биопротектин КД порошок»	45 г/кг	180	Молочная продуктивность, показатели качества молока, коэффициент молочности
опыт 2-й	ОР + + «Биопротектин КД гранулы»	45 г/кг		
контроль	ОР	–		
Телята n = 30				
опыт 1-й	Молозиво, молоко, ОР + + «Биопротектин КД порошок»	3,6 г/кг	450	Показатели прироста и качественные показатели мяса
опыт 2-й	Молозиво, молоко, ОР + + «Биопротектин КД гранулы»	3,6 г/кг		
контроль	ОР	–		
Свиноматки n = 30				
опыт 1-й	ОР + + «Биопротектин КД порошок»	30 г/кг	180	Показатель репродуктивности и молочности
опыт 2-й	ОР + + «Биопротектин КД гранулы»	45 г/кг		
контроль	ОР	–		
Поросята n = 30				
опыт 1-й	Молозиво, молоко, ОР + + «Биопротектин КД порошок»	2 г/кг	360	Показатели прироста и качественные показатели мяса
опыт 2-й	Молозиво, молоко, ОР + + «Биопротектин КД гранулы»	2 г/кг		
контроль	ОР	–		

При выявлении статистически значимых межгрупповых различий проводили попарные сравнения с использованием t -теста Уэлча для независимых выборок с поправкой Holm — Bonferroni на множественные сравнения. Уровень статистической значимости считали достоверным при $p < 0,05$, высоко достоверным при $p < 0,01$ и крайне достоверным при $p < 0,001$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Высокопродуктивные животные и молодняк с интенсивными темпами роста имеют напряженный обмен веществ и, как следствие, нарушения работы гастроинтестинального тракта и гепатобилиарной системы, что отражается не только на приростах молодняка и качестве воспроизводства животных, но и на физико-химическом составе продукции животноводства, который отражает показатели качества продукции.

В рамках проводимых исследований для изучения влияния функциональных пробиотических кормовых добавок на коровах авторы прежде всего учитывали молочную продуктивность путем анализа данных за полугодовую лактацию животных.

Для оценки молочной продуктивности сравнивали массу животных, показатели удоя в целом и коэффициент молочности за полугодовую лактацию.

²³ 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

²⁴ 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».

²⁵ <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/734258/>

В группе животных, получавших «Биопротектин КД порошок», отмечена самая высокая масса тела животных, составляющая $499,11 \pm 2,51$ кг, что незначительно отличается от опытной группы животных, получавших «Биопротектин КД гранулы», однако выше на 3,0% ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой, не получавшей пробиотика.

При этом самый высокий удой за полугодовую лактацию выявлен в опытной группе животных, получавших «Биопротектин КД гранулы», содержащий шрот расторопши пятнистой, который составил $3622,15 \pm 2,62$ кг, что на 5,8% ($p < 0,01$) больше контрольной группы, что, скорее всего, связано с тем, что входящие в состав кормовой добавки «Биопротектин КД гранулы» шрот расторопши и его биологически активные вещества в нативном виде влияют на метаболизм гормонов, в том числе эстрогенов, что в свою очередь стимулирует выделение желчи, улучшаются переваривание жиров и усвоение жирорастворимых витаминов, при этом средний коэффициент молочности отличается как от опытной 1-й группы на 19,9% ($p < 0,01$), так и от контрольной на 20,6% ($p < 0,001$) (табл. 4). При этом экстракт расторопши пятнистой, содержащийся в кормовой добавке, используемой в 1-й опытной группе, оказывает менее выраженное стимулирующее воздействие ввиду высокой концентрации, низкой абсорбции и энтерогепатической циркуляции.

При анализе молочной продуктивности в динамике отмечается значительно низкий показатель коэффициента молочности в контрольной группе с самого начала эксперимента, что отражено в таблице 5.

Качественные показатели молока находятся в прямой зависимости от поступления в организм биологически активных веществ, от их концентрации, соотношения, биологической доступности и в случае пробиотических штаммов возможности адгезии. Используемые в рецептурах пробиотические штаммы лактобацилл и бифидобактерий наряду с другими ингредиентами кормовых добавок производят биологически активные субстанции, что влияет на химический состав молока.

Из данных таблицы 6 следует, что в молоке контрольной группы массовая доля жира составила 3,53%, в молоке 1-й опытной группы — 3,59%, а 2-й опытной группы — 3,67%, при этом массовая доля белка в молоке коров 1-й опытной группы составляла 3,31%, 2-й опытной группы — 3,37% против контроля 2,28% ($p < 0,01$; $p < 0,001$).

Таблица 4. Молочная продуктивность коров за полугодовую лактацию
Table 4. Milk production of cows during a six-month lactation

Группы (n = 10)	Живая масса, кг	Удой за лактацию	Коэффициент молочности, %
Опытная 1-я	$499,11 \pm 2,51$	$3526,11 \pm 3,59$	$725,628 \pm 27,88$
Опытная 2-я	$496,10 \pm 2,01$	$3622,15 \pm 2,62$	$745,53 \pm 26,27$
Контрольная	$486,89 \pm 2,23$	$3497,63 \pm 2,08$	$724,88 \pm 17,99$

Таблица 5. Коэффициент молочности
Table 5. Milk yield coefficient

Группы n = 10	1-й месяц лактации (июнь)	2-й месяц лактации (июль)	3-й месяц лактации (август)	4-й месяц лактации (сентябрь)	5-й месяц лактации (октябрь)
Опытная 1-я	$735,49 \pm 9,80$	$733,79 \pm 8,1$	$729,27 \pm 3,6$	$723,12 \pm 2,5$	$706,47 \pm 19,4$
Опытная 2-я	$755,54 \pm 10,08$	$752,02 \pm 6,40$	$748,34 \pm 2,81$	$741,63 \pm 3,90$	$730,12 \pm 15,41$
Контрольная	$729,61 \pm 13,27$	$728,80 \pm 14,08$	$725,09 \pm 17,79$	$722,57 \pm 20,30$	$718,36 \pm 24,52$

Таблица 6. Показатели качества молока за 6 месяцев лактации
Table 6. Milk quality indicators for 6 months of lactation

Группы N = 10	Массовая доля жира, %	Массовая доля белка, %	Количество соматических клеток
Опытная 1-я	$3,59 \pm 0,08$	$3,31 \pm 0,10$	$135,38 \pm 2,03$
Опытная 2-я	$3,67 \pm 0,05$	$3,37 \pm 0,022$	$132,04 \pm 3,04$
Контрольная	$3,53 \pm 0,09$	$3,28 \pm 0,066$	$166,86 \pm 3,79$

Проведенный анализ показывает, что более высокий показатель жирномолочности у животных 2-й опытной группы, где применяли кормовую добавку с содержанием шрота расторопши пятнистой, получен за счет более высокого показателя среднего лактационного удоя при увеличении процентного содержания жира и белка в молоке.

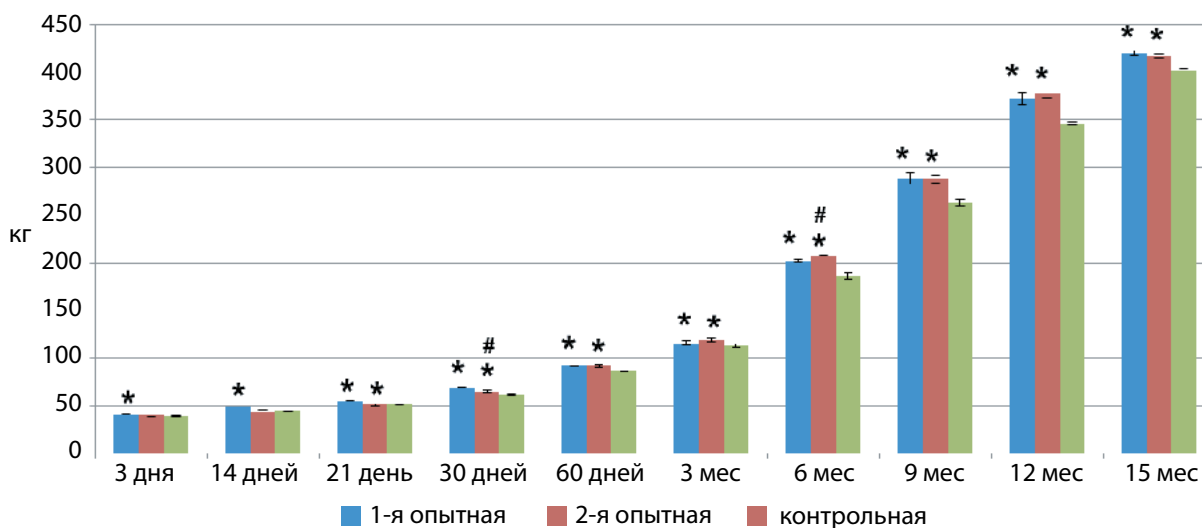
Введение в основной рацион лактирующих коров опытных групп кормовых добавок повлияло на снижение уровня соматических клеток в молоке по сравнению с контрольной на 8,5% ($p < 0,05$) и 13,2% ($p < 0,01$) соответственно.

Изучая физиологическое состояние телят, была выявлена закономерная динамика прироста живой массы на всем протяжении эксперимента (рис. 3). Для статистической оценки различий между группами на каждом сроке наблюдения использовали двухвыборочный t-тест Уэлча для независимых выборок с поправкой Holm — Bonferroni на множественные сравнения. Дополнительно выполняли однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) по группам в контрольные сроки для подтверждения межгрупповых эффектов. Наиболее высокие темпы прироста были зарегистрированы у животных опытных групп, получавших пробиотические кормовые добавки, причем наибольший эффект наблюдали в группе, где применяли «Биопротектин КД порошок».

Показатель среднесуточного прироста от 3 суток до 15 месяцев составил 851 г/сут в 1-й опытной группе и 845 г/сут во 2-й опытной группе, тогда как в контрольной группе — 813 г/сут. Уже с 3-го дня 1-я опытная группа статистически значимо отличалась от контроля ($p < 0,001$), а для 2-й опытной группы различия стали значимыми к 30-му дню ($p = 0,02$) и усилились к 60-му ($p = 0,002$), что подтверждает стимулирующее действие пробиотических добавок на рост животных.

Рис. 3. Динамика прироста живой массы телят: * статистически значимые различия ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой (t-тест Уэлча с поправкой Holm)

Fig. 3. Dynamics of calf live weight gain: * statistically significant differences ($p < 0,05$) compared to the control group (Welch's t-test with Holm correction)



Анализ динамики выявил определенные различия по показателю прироста массы между опытными группами. Так, в 1-й опытной группе достоверное превышение массы по сравнению с контролем регистрировалось уже на ранних сроках — на 3-й и 14-й дни жизни ($p < 0,05$), что указывает на более быстрый запуск метаболических эффектов добавки. Во 2-й опытной группе статистически значимые различия проявлялись позже и достигали уровня значимости только к 30-му дню ($p < 0,001$). Начиная с этого срока, обе опытные группы сохраняли статистически значимое преимущество над контролем на протяжении всего последующего периода наблюдения ($p < 0,001$), тогда как между собой они значимо не различались, за исключением отдельных точек (например, 30 дней и 6 месяцев). К шестимесячному возрасту и далее показатели прироста у животных, получавших разные добавки, становились сопоставимыми, что свидетельствует о сходной эффективности примененных схем в долгосрочной перспективе.

С целью изучения влияния пробиотических кормовых добавок на мясную продуктивность крупного рогатого скота черно-пестрой бессоновской породы был проведен контрольный забой телят во всех трех группах после рандомизированного отбора 5 голов из каждой группы. После технологических манипуляций провели контрольное взвешивание туш, которое показало, что наиболее тяжеловесными оказались туши молодняка, получавшего кормовые добавки, что выражалось в явной процентной прогрессии — +5,3% ($p < 0,05$) и +7,4% ($p < 0,01$), соответственно, по отношению к контрольной группе. При этом убойные показатели молодняка 2-й опытной группы значительно отличались от показателей контроля и были выше показателей 1-й опытной группы.

Так, групповой выход туши составил $63,48 \pm 2,61\%$, что на 3,06 п. п. ($p < 0,01$) больше контроля и на 2,23 п. п. ($p < 0,05$) аналогичного

показателя 1-й опытной группы, при этом групповой выход висцерального жира составил $3,53 \pm 0,33\%$, что с достоверной разницей больше на 0,59 п. п. ($p < 0,05$) по сравнению с контролем и на 0,47 п. п. ($p < 0,05$) по сравнению с 1-й опытной группой.

Высокие показатели выхода туши связаны с более высокой массой животных, которым в основной рацион добавляли пробиотические кормовые добавки, при этом разница между опытными группами связана с тем, что шрот расторопши повышает перевариваемость питательных веществ за счет повышения метаболических процессов рубцового пищеварения. Результаты исследований морфологического состава по группам туш животных, откормленных на различных рационах, представлены в таблице 8.

При изучении физико-химических свойств мяса, указанных на рисунке 4, было установлено, что общее соотношение жира к белку (среднее отношение «жир — белок») составляло 0,615 в контрольной группе, 0,594 в 1-й опытной группе и 0,582 во 2-й опытной группе, что отражает более высокую белковую насыщенность мышечной ткани в опытных группах. Однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) по трем независимым группам (опытной 1-й, опытной 2-й, контрольной) показал статистически значимые межгрупповые различия только для массовой доли белка (F , $p < 0,001$); для влаги и жира различий не выявлено ($p > 0,05$).

В пост-хок попарных сравнениях (t-тест Уэлча с поправкой Holm) массовая доля белка была выше в обеих опытных группах по сравнению с контрольной (опытная 1-я vs контрольная: $p < 0,01$; опытная 2-я vs контрольная: $p < 0,001$), тогда как опытная 1-я и опытная 2-я между собой не различались ($p = 0,24$). По влаге различий не было (только пограничная тенденция для опытной 2-й против контроля, $p \approx 0,06$), по жиру различий тоже не выявлено (все $p > 0,1$).

Таблица 8. Оценка мясной продуктивности телят после убоя

Table 8. Evaluation of calves' meat productivity after slaughter

Группы животных (n = 5)	Масса, кг		Групповая масса перед убоем, кг	Выход туши, %	Групповой выход туши, %	Масса висцерального жира, %	Выход висцерального жира, %	Групповой выход висцерального жира, %	Убойная масса, кг	Убойный выход, %
	парной туши	животного перед убоем								
Опытная 1-я	254,40	420,05	419,22 ± 1,18	60,46	60,56 ± 0,22	13,65	3,35	3,18 ± 0,12	268,05	63,81
	255,65	421,16		60,70		13,95	3,31		269,60	64,01
	253,12	418,76		60,44		13,45	3,21		266,57	63,65
	256,00	421,52		60,73		13,23	3,14		269,23	63,87
	252,97	418,12		60,50		12,14	2,90		265,11	63,40
Опытная 2-я	276,50	428,86	421,53 ± 3,56	59,31	63,48 ± 2,61	12,55	3,03	3,53 ± 0,33	289,05	62,35
	253,60	417,17		60,79		13,25	3,17		266,85	63,15
	250,50	415,75		60,25		12,99	3,12		263,49	63,37
	261,25	422,77		61,79		18,54	4,39		279,79	66,18
	263,17	423,13		62,19		16,84	3,97		280,01	66,17
Контрольная	234,25	403,15	401,97 ± 0,72	58,10	54,41 ± 2,02	12,54	3,10	3,13 ± 0,06	246,79	61,21
	231,20	402,05		57,50		12,30	3,05		243,50	60,56
	230,00	400,58		57,37		12,01	2,99		242,04	60,37
	230,45	402,43		57,26		12,66	3,15		243,11	60,41
	228,45	401,67		56,87		13,53	3,37		241,98	60,24

Таблица 9. Технологические свойства сырого мяса телят на примере широчайшей мышцы спины (рандомизация путем случайной выборки 5 из 10)

Table 9. Technological properties of raw calf meat using the latissimus dorsi muscle as an example (randomization by random sampling of 5 out of 10)

Группы (n = 5)	Влагоудерживающая способность / pH										Групповой показатель pH	Групповой показатель влагоудерживающей способности
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Опытная 1-я	66,98	5,75	66,75	5,78	66,80	5,80	66,79	5,72	66,76	5,77	5,76 ± 0,024	66,81 ± 0,06
Опытная 2-я	66,45	5,91	66,58	5,87	66,77	5,75	66,55	5,83	66,51	5,89	5,85 ± 0,046	66,57 ± 0,08
Контрольная	65,13	5,65	65,18	5,80	65,01	5,68	65,11	5,67	65,07	5,63	5,69 ± 0,044	65,10 ± 0,04

При детализации по группам мышц отмечено, что в мышцах лопаточно-плечевого пояса средние значения влаги и белка во 2-й опытной были наибольшими — 67,66% и 22,07% соответственно; при сравнении с контрольной группой эти различия по белку сохраняются и остаются статистически значимыми (Holmsкорр. $p < 0,001$), по влаге — тенденция (Holmsкорр. $p \approx 0,05$); по отношению к 1-й опытной различия по белку и влаге в лопаточно-плечевой группе мышц не достигали статистической значимости после поправки на множественные сравнения ($p > 0,05$). При этом незначительное увеличение массовой доли жира (на уровне десятых долей процента) отмечали в 1-й опытной по сравнению с контрольной и во 2-й опытной, однако статистической значимости не достигло (все $p > 0,1$).

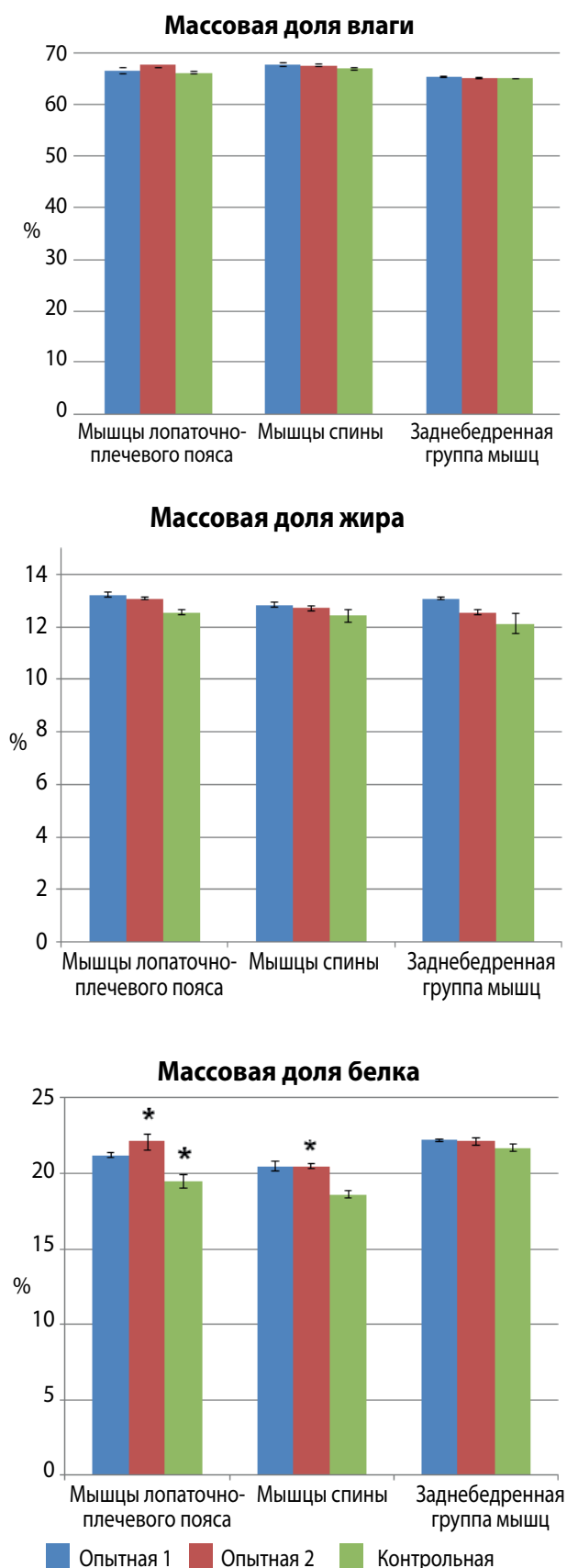
Наиболее высокими технологическими показателями мяса отличались животные, получавшие функциональные кормовые добавки, обеих опытных групп, особенно можно выделить показатель влагоудерживающей способности, отличающийся на 2,74 п. п., во 2-й опытной группе по сравнению с контрольной ($p < 0,01$), при незначительном различии групповых показателей pH, указанных в таблице 9.

Изучение молочности и физико-химического состава молока свиноматок показало невысокую вариабельность результатов, при этом средний показатель молочности составил в 1-й опытной группе $52,73 \pm 0,16$ кг, во 2-й опытной группе $54,13 \pm 0,09$ кг, что достоверно больше относительно аналогичного показателя в контрольной группе ($49,98 \pm 0,19$ кг, +5,5%, $p < 0,05$ и +8,3%, $p < 0,001$ соответственно) (табл. 10). При этом соотношение жира и белка во всех опытных группах значительно не различалось, однако в контрольной группе, где фиксировали рождение поросят-гипотрофиков и более высокий процент отхода в первые 30 дней жизни, показатели жирности составили $5,1 \pm 0,27$, а показатели белка — $4,13 \pm 0,11$, что ниже показателей в опытных группах на 18,6% и 7,2% соответственно.

Следует учитывать, что на дальнейшее развитие поросят влияют такие факторы, как физиологическая незрелость. В настоящих исследованиях было отмечено значительно большее количество поросят-гипотрофиков, чем в опытных группах. Как видно из таблицы 10, наличие гипотрофического потомства увеличивало процент отхода молодняка во всех исследуемых группах, что, скорее всего, связано с интенсивными технологиями

Рис. 4. Химический состав мяса: * статистически значимые различия ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой (t-тест Уэлча с поправкой Holm)

Fig. 4. Chemical composition of meat: * statistically significant differences ($p < 0,05$) compared to the control group (Welch's t-test with Holm correction)



выращивания свинины, безвыгульным содержанием животных, концентратным типом кормления, длительностью эксплуатации свиноматок и генетическим многоплодием, а также качеством спермы. Снижение процента сохранности наблюдалось в первые 30 дней.

На основе полученных данных отмечено, что поросята опытных групп были более активными, отличались хорошим рефлексом сосания и кормовым поведением в целом, при этом групповая масса гнезда 2-й опытной группы на 1-й день составила $12,04 \pm 0,04$ кг, на 30-й — $79,54 \pm 5,49$ кг, а на 60-й — $179,92 \pm 13,07$ кг при групповой сохранности 97,5%, что в 1,03 раза больше, чем в 1-й опытной группе, и на 26,1% ($p < 0,001$) и 22,9% ($p < 0,01$) больше контрольной соответственно.

Во всех трех группах живая масса поросят увеличивалась неравномерно, при этом, сравнивая живую массу в начале эксперимента с живой массой в конце эксперимента, можно отметить, что разница между двумя опытными группами была незначительной — 2,3%, а с контрольной группой — 24,5% и 26% соответственно. Для изучения количественных и качественных показателей мясной продуктивности подопытного молодняка авторами согласно дизайну исследований был проведен контрольный забой (по пять голов из каждой группы). Убойные показатели молодняка свиней 2-й опытной группы значительно отличались от показателей контроля и были выше показателей 1-й опытной группы.

Так, групповой выход туши составил $356,79 \pm 0,07$ кг, что на 4,3% ($p < 0,01$) больше контроля и на 1,6% ($p < 0,05$) аналогичного показателя 1-й опытной группы, при этом средняя масса парной туши составила $101,19 \pm 0,12$ кг, что с достоверной разницей больше на 4,9% ($p < 0,01$) по сравнению с контролем и на 1,4% ($p < 0,05$) аналогичного показателя 1-й опытной группы.

Для характеристики химического состава мяса определения отложения висцерального жира авторами в процессе исследования изучался длиннейший мускул спины. Результаты исследования отражены в таблицах 12, 13.

Длиннейшая мышца спины, полученная от животных 2-й опытной группы, характеризовалась более высоким содержанием влаги по сравнению с 1-й опытной группой и с контролем, что выражалось в достоверно значимых различиях — +0,45% ($p < 0,05$) и +0,92% ($p < 0,01$) соответственно. Высокий групповой показатель pH наблюдали в 1-й опытной группе — $6,22 \pm 0,025$, что на 0,11 ед. ($p < 0,05$) больше по сравнению со 2-й опытной группой и на 0,17 ед. ($p < 0,01$) — контрольной группы.

При изучении физико-химических свойств мяса, указанных на графике, было установлено, что общее соотношение жира к белку во 2-й опытной группе составляло 0,60, что на 3,4% больше, чем в 1-й опытной группе, и на 7,1% — по сравнению с контрольной.

Таблица 10. Оценка мясной продуктивности молодняка свиней после убоя

Table 10. Assessment of meat productivity of young pigs after slaughter

Группы животных (n = 5)		Масса, кг		Групповая масса перед убоем, кг	Выход туши, %	Групповой выход туши, кг	Масса шпика, кг	Выход шпика, %	Убойная масса, кг	Убойный выход, %
		парной туши	животного перед убоем							
Опытная 1-я	1	69,90	99,80	400,72 ± 19,80	70,04	351,08 ± 0,23	11,32	11,34	81,22	81,38
	2	70,25	100,00		70,25		10,45	10,45	80,70	80,70
	3	70,77	100,02		70,77		9,75	9,73	80,52	80,50
	4	69,99	99,95		70,02		10,66	10,67	80,65	80,69
	5	70,00	99,95		70,00		10,68	10,77	80,68	80,72
Опытная 2-я	1	72,50	101,60	505,95 ± 0,29	71,35	356,79 ± 0,07	10,50	10,34	83,00	81,69
	2	71,88	100,85		71,46		10,39	10,11	82,27	81,57
	3	71,96	100,80		71,39		10,32	10,23	82,28	81,62
	4	72,32	101,45		71,28		10,55	10,40	82,87	81,68
	5	72,12	101,25		71,22		10,54	10,41	82,66	81,63
Контрольная	1	67,88	98,00	491,55 ± 0,34	69,26	344,64 ± 0,26	2,67	2,72	70,55	71,98
	2	67,11	97,95		68,51		2,88	2,94	69,99	71,45
	3	67,90	98,10		69,21		2,65	2,78	70,55	71,91
	4	67,94	98,50		68,97		2,85	2,89	70,79	71,86
	5	68,00	99,00		68,69		3,12	3,14	71,12	71,83

Таблица 11. Химический состав длиннейшей мышцы спины молодняка 6-месячного возраста (рандомизация путем случайной выборки 5 из 10)

Table 11. Chemical composition of the longest muscle of the back of 6-month-old young animals (randomization by random sampling of 5 out of 10)

Группы	Массовая доля влаги, %					Массовая доля белка, %					Массовая доля жира, %				
	Группы животных (n = 5)														
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Опытная 1-я	72,55	72,52	72,45	72,52	72,47	24,16	24,05	24,45	24,15	24,07	3,85	3,90	3,95	3,77	3,79
Опытная 2-я	71,80	71,50	71,77	71,56	72,00	24,80	24,94	24,70	24,83	24,87	4,21	4,25	4,24	4,23	4,22
Контрольная	73,50	73,15	73,35	73,27	73,33	23,01	23,05	23,03	23,09	23,06	3,22	2,25	2,35	2,43	3,07

Таблица 12. Технологические свойства мяса молодняка месячного возраста на примере длиннейшей мышцы спины (рандомизация путем случайной выборки 5 из 10)

Table 12. Technological properties of meat from one-month-old calves, exemplified by the longissimus dorsi muscle (randomization by random sampling of 5 out of 10)

Группы (n = 5)	Влагоудерживающая способность, % / pH										Групповой показатель pH	Групповой показатель влагоудерживающей способности
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Опытная 1-я	69,28	6,18	69,25	6,28	69,30	6,20	69,29	6,22	69,26	6,25	6,22 ± 0,025	69,27 ± 0,02
Опытная 2-я	70,45	6,15	70,68	6,20	70,75	6,25	70,65	6,30	70,57	6,19	6,21 ± 0,041	70,62 ± 0,08
Контрольная	68,13	6,13	68,18	6,10	68,11	6,08	68,13	6,07	68,25	6,03	6,08 ± 0,02	65,10 ± 0,04

Выводы/Conclusions

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы о том, что при сравнительной оценке продуктивности выращиваемого молодняка КРС бессоновской породы и свиней 3-породного гибрида подтверждена эффективность использования кормовых добавок «Биопротектин КД порошок» и «Биопротектин КД гранулы». При этом скармливание кормовых добавок в составе основного рациона положительно влияет на интенсивность роста телят и молодняка свиней, что отражается на среднесуточных приростах. Так, живая масса в опытных группах телят была на

4,7% и 3,8% выше по сравнению с контрольной, во 2-й опытной по сравнению с 1-й — на 0,9%, а живая масса молодняка свиней в опытных группах составила $99,83 \pm 0,13$ кг и $101,19 \pm 0,12$ кг, что на 3,5% и 4,9% больше аналогичного показателя в контрольной группе.

Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют о положительном влиянии кормовых добавок «Биопротектин КД порошок» и «Биопротектин КД гранулы» на организм лактирующих животных, которые способствуют увеличению молочной продуктивности и, как следствие, улучшению качественных показателей молока.

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. Кубышко А. О факторах стратегической устойчивости мясной отрасли. По итогам XVI бизнес-конференции «Агроинвестор: PRO животноводство и комбикорма». *Мясная индустрия*. 2023; (5): 4–8. <https://elibrary.ru/bnfiwc>
2. Жучаев К.В., Кочнева М.Л., Борисенко Е.А. Благополучие продуктивных животных (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2024; 59(6): 1025–1038. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.6.1025rus>
3. Герасимова М.В., Курятова Е.В. Статистический анализ распространения болезней органов пищеварения крупного рогатого скота с незаразной этиологией в Амурской области. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2017; (1): 35–39. <https://elibrary.ru/zvlait>
4. Инюкин А.Ф., Жукова В.М. Продовольственная безопасность Российской Федерации: современное состояние, проблемы и способы их решения. *Обеспечение продовольственной безопасности России в условиях формирования нового технологического уклада. Сборник материалов и докладов I Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию экономического факультета*. Краснодар: ИП Алзидан М. 2025; 77–83. <https://elibrary.ru/wvtqop>
5. Самгулов А.Ш. Аграрная политика как механизм обеспечения продовольственной безопасности: субъектные и функциональные особенности. *Вопросы политологии*. 2025; 4(116): 1343–1351. <https://doi.org/10.35775/PSI.2025.116.4.021>
6. 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>
7. Aatambayeva 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>
8. Смольникова Ф.Х., Наурзбаева Г.К., Ребезов М.Б., Оксханова Э.К., Кулуштаева Б.М. Исследование пищевой безопасности сливочного масла с растительными компонентами. *Вестник Университета Шакарима. Серия: Технические науки*. 2024; 4(16): 190–199. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-25](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-25)
9. Овчинникова Е.К., Судаков Н.Н., Максимиук Н.Н., Морозов М.В. Совершенствование условий содержания и кормления молочных коров. *Аграрная наука*. 2024; (12): 70–76. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-70-76>
10. 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>
11. Горелик О.В., Горелик А.С., Ребезов М.Б., Харлап С.Ю. Оценка влияния генотипа по голштинской породе на продуктивные качества коров. *Аграрная наука*. 2025; (2): 101–107. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-101-107>
12. Баймишева Т.А., Пенкин А.А. Современное состояние мясного скотоводства в РФ. *Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2024; 36–41. <https://elibrary.ru/suwzcc>
13. Баяуров Л.И. Современное состояние мясного скотоводства в мире. *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. Трубиллина. 2024; 19–26. <https://elibrary.ru/lqcytc>
14. Репникова В.И. Современное состояние и тенденции развития отечественного мясного скотоводства. *Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: XVI Международная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения заслуженного экономиста РФ, заслуженного работника сельского хозяйства РФ, заслуженного ученого Брянской области, академика Академии народов мира «Элита» доктора экономических наук, профессора Е.П. Чиркова*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2025; 139–146. <https://elibrary.ru/vjsgph>
15. Романов В.Н., Боголюбова Н.В., Лаптев Г.Ю., Ильина Л.А. Современные способы улучшения здоровья и роста продуктивности жвачных животных. Дубровицы: *ФНЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста*. 2019; 128. ISBN 978-5-902483-51-9 <https://elibrary.ru/slaqlb>

REFERENCES

1. Kubyshko A. About the factors of strategic sustainability of the meat industry. Based on the results of the XVI business conference "Agroinvestor: PRO livestock and animal feed". *Meat Industry*. 2023; (5): 4–8 (in Russian). <https://elibrary.ru/bnfiwc>
2. Zhuchayev K.V., Kochneva M.L., Borisenko E.A. Welfare of Productive Animals (Review). *Agricultural Biology (Sel'skokhozyaystvennaya biologiya)*. 2024; 59(6): 1025–1038 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.6.1025rus>
3. Gerasimova M.V., Kuryatova E.V. Statistical analysis of spread of cattle digestive organs diseases with noncontagious etiology in the Amur Region. *Far East agrarian herald*. 2017; (1): 35–39 (in Russian). <https://elibrary.ru/zvlait>
4. Inyukin A.F., Zhukova V.M. Food security of the Russian Federation: current status, problems and solutions. *Ensuring food security of Russia in the context of the formation of a new technological order. Collection of materials and reports of the I International scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the Faculty of Economics*. Krasnodar: Individual entrepreneur Alzidan M. 2025; 77–83 (in Russian). <https://elibrary.ru/wvtqop>
5. Samgurov A.Sh. Agrarian policy as a mechanism for ensuring food security: subjective and functional characteristics. *Political Science Issues*. 2025; 4(116): 1343–1351 (in Russian). <https://doi.org/10.35775/PSI.2025.116.4.021>
6. 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>
7. Aatambayeva 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>
8. Smolnikova F.H., Naurzbaeva G.K., Rebezov M.B., Okuskhanova E.K., Kulushtaeva B.M. Investigation of the food safety of butter with vegetable ingredients. *Bulletin of Shakarim University. Series: Technical Sciences*. 2024; 4(16): 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)
9. Ovchinnikova E.K., Sudakov N.N., Maksimuk N.N., Morozov M.V. Improving the conditions of keeping and feeding dairy cows. *Agrarian science*. 2024; (12): 70–76 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-70-76>
10. Grechikina 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>
11. Gorelik O.V., Gorelik A.S., Rebezov M.B., Kharlap S.Yu. Assessment of the effect of the Holstein breed genotype on the productive qualities of cows. *Agrarian science*. 2025; (2): 101–107 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-101-107>
12. Baimisheva T.A., Penkin A.A. Current state of beef cattle breeding in the Russian Federation. *Actual issues of economics and agribusiness: Collection of works of the XV International scientific and practical conference*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2024; 36–41 (in Russian). <https://elibrary.ru/suwzcc>
13. Bayurov L.I. Current state of beef cattle breeding in the world. *Modern problems in animal husbandry: status, solutions, prospects. a Collection of Articles Based on the Proceedings 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; 19–26 (in Russian). <https://elibrary.ru/lqcytc>
14. Repnikova V.I. Current state and development trends of domestic beef cattle breeding. *Current issues of economics and agribusiness: XVI International scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of Honored Economist of the Russian Federation, Honored Worker of Agriculture of the Russian Federation, Honored Scientist of the Bryansk Region, Academician of the Academy of the Peoples of the World "Elite" Doctor of Economics, Professor E.P. Chirkov*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2025; 139–146 (in Russian). <https://elibrary.ru/vjsgph>
15. Romanov V.N., Bogolyubova N.V., Laptev G.Yu., Ilyina L.A. Modern ways to improve the health and productivity of ruminants. Dubrovitsy: *L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry*. 2019; 128 (in Russian). ISBN 978-5-902483-51-9 <https://elibrary.ru/slaqlb>

16. Клейменова Н.Л. Жирнокислотный состав масла семян расторопши пятнистой, полученного методом холодного прессования. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2020; 82(4): 102–106. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-102-106>
17. Жданова И.Н. Анализ распространения желудочно-кишечных и респираторных заболеваний крупного рогатого скота с незаразной этиологией в Пермском крае. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. 2019; (4): 63–68. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.4.7>
18. Гринь В.А., Кузьминов Н.Д. Алгоритмы диагностики гепатопатологий крупного рогатого скота с использованием метода системного анализа. *Сборник научных трудов КНЦЗВ*. 2020; 9(1): 217–221. <https://doi.org/10.34617/bths-5y68>
19. Мищенко В.А., Мищенко А.В., Яшин Р.В., Евграфова В.А., Никешина Т.Б. Метаболические заболевания крупного рогатого скота. *Ветеринария сегодня*. 2021; 10(3): 184–189. <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2021-3-38-184-189>
20. Шулаев Г.М., Милушев Р.К., Доровских В.И., Жариков В.С. Технология приготовления кормовой добавки из семян расторопши. *Техника и технологии в животноводстве*. 2023; (1): 54–59. <https://doi.org/10.22314/27132064-2023-1-54>
21. Шемуранова Н.А., Гарифуллина Н.А. Растения как основа для создания экологически безопасных высокофункциональных биодобавок для животных (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020; 21(5): 483–502. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.483-502>
22. Тагиров Х.Х., Вагатов Ф.Ф. Особенности роста и развития бычков черно-пестрой породы при скормлинии пробиотической кормовой добавки «Биогумител». *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2012; (6): 123–126. <https://elibrary.ru/pmwlln>
23. Reid G. Probiotics for Urogenital Health. *Nutrition in Clinical Care*. 2002; 5(1): 3–8. <https://doi.org/10.1046/j.1523-5408.2002.00512.x>
24. Максимова Р.А., Ермолова Е.М., Косилов В.И., Карматских Ю.А. Влияние кормовых добавок на гематологические и биохимические показатели крови лактирующих коров. *Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство*. 2022; (1): 27–33. <https://doi.org/10.33920/sel-05-2201-03>
25. Le Q.-U., Lay H.-L., Wu M.-C., Joshi R.K. Phytoconstituents and pharmacological activities of *Silybum marianum* (Milk Thistle): a critical review. *American Journal of Essential Oils and Natural Products*. 2018; 6(4): 41–47.
26. Mhamdi B., Abbassi F., Smaoui A., Abdely C., Marzouk B. Fatty acids, essential oil and phenolics composition of *Silybum marianum* seeds and their antioxidant activities. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016; 29(3): 951–959.
27. Michaylova M., Minkova S., Kimura K., Sasaki T., Isawa K. Isolation and characterization of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* from plants in Bulgaria. *FEMS Microbiology Letters*. 2007; 269(1): 160–169. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00631.x>
28. Ардатская М.Д. Роль синбиотиков в коррекции нарушений микробиоты кишечника и повышенной проницаемости кишечной стенки. *Consilium Medicum*. 2024; 26(5): 332–340. <https://doi.org/10.26442/20751753.2024.5.202929>
29. Григорьев Д.Ю., Жмаев Е.А., Лебедев А.А., Пирогов Д.А. Комплексный препарат силимарина увеличивает удой, содержание жира и белка в молоке коров в период раздоя. *Молочное и мясное скотоводство*. 2019; (6): 47–50. <https://elibrary.ru/qrynqd>
30. Щелоченков С.В., Гуськова О.Н., Бордин Д.С. Клинико-эндоскопические и морфологические аспекты аутоиммунного гастрита. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2022; (4): 14–19. <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-200-4-14-19>
31. Kamada T., Maruyama Y., Monobe Y., Haruma K. Endoscopic features and clinical importance of autoimmune gastritis. *Digestive Endoscopy*. 2022; 34(4): 700–713. <https://doi.org/10.1111/den.14175>
32. Bachmann H., Starrenburg M.J.C., Molenaar D., Kleerebezem M., van Hylckama Vlieg J.E.T. Microbial domestication signatures of *Lactococcus lactis* can be reproduced by experimental evolution. *Genome Research*. 2012; 22(1): 115–124. <https://doi.org/10.1101/gr.121285.111>
33. Olmos J., Paniagua-Michel J. *Bacillus subtilis* a Potential Probiotic Bacterium to Formulate Functional Feeds for Aquaculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*. 2014; 6(7): 361–365.
34. Шевандова А.А. и др. Метаболическая интеграция «кишечник — печень»: теоретические основы взаимодействия и терапевтические перспективы. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2021; 16(2): 222–226 (на англ. яз.). <https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16052>
16. Kleymenova N.L. Fatty acid composition of milk thistle seed oil obtained with cold pressing. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020; 82(4): 102–106 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-102-106>
17. Zhdanova I.N. Analysis of the distribution of gastrointestinal and respiratory diseases of cattle with non-infectious. *Perm Federal Research Centre Journal*. 2019; (4): 63–68 (in Russian). <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.4.7>
18. Grin V.A., Kuzminov N.D. Diagnostic algorithms for cattle hepatopathologies using system analysis methods. *Collection of Scientific Papers of KRCAHVM*. 2020; 9(1): 217–221 (in Russian). <https://doi.org/10.34617/bths-5y68>
19. Mishchenko V.A., Mishchenko A.V., Yashin R.V., Yevgrafova V.A., Nikeshina T.B. Metabolic diseases in cattle. *Veterinary Science Today*. 2021; 10(3): 184–189 (in Russian). <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2021-3-38-184-189>
20. Shulaev G.M., Milushev R.K., Dorovskikh V.I., Zharikov V.S. Technology of feed additives from thistle's seeds preparation. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*. 2023; (1): 54–59 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/27132064-2023-1-54>
21. Shemuranova N.A., Garifullina N.A. Plants as the basis for the development of environmentally friendly highly functional bioadditives for animals (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020; 21(5): 483–502 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.483-502>
22. Tagirov Kh.Kh., Vagapov F.F. Peculiarities of growth and development of Blacks-Potted steers fed the "Biogumitel" probiotic feed supplement. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2012; (6): 123–126 (in Russian). <https://elibrary.ru/pmwlln>
23. Reid G. Probiotics for Urogenital Health. *Nutrition in Clinical Care*. 2002; 5(1): 3–8. <https://doi.org/10.1046/j.1523-5408.2002.00512.x>
24. Maksimova R.A., Ermolova E.M., Kosilov V.I., Karmatskikh Yu.A. Influence of feed additives on the hematological and biochemical parameters of the blood of lactating cows. *Feeding of Agricultural Animals and Feed Production*. 2022; (1): 27–33 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/sel-05-2201-03>
25. Le Q.-U., Lay H.-L., Wu M.-C., Joshi R.K. Phytoconstituents and pharmacological activities of *Silybum marianum* (Milk Thistle): a critical review. *American Journal of Essential Oils and Natural Products*. 2018; 6(4): 41–47.
26. Mhamdi B., Abbassi F., Smaoui A., Abdely C., Marzouk B. Fatty acids, essential oil and phenolics composition of *Silybum marianum* seeds and their antioxidant activities. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016; 29(3): 951–959.
27. Michaylova M., Minkova S., Kimura K., Sasaki T., Isawa K. Isolation and characterization of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* from plants in Bulgaria. *FEMS Microbiology Letters*. 2007; 269(1): 160–169. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00631.x>
28. Ardatskaya M.D. The role of synbiotics in correcting gut microbiota disorders and increased intestinal permeability: a review. *Consilium Medicum*. 2024; 26(5): 332–340 (in Russian). <https://doi.org/10.26442/20751753.2024.5.202929>
29. Grigoriev D.Yu., Zhmaev E.A., Lebedev A.A., Pirogov D.A. The complex preparation of silymarin increases milk yield, fat and protein content in cows' milk during early lactation. *Dairy and beef cattle farming*. 2019; (6): 47–50 (in Russian). <https://elibrary.ru/qrynqd>
30. Shchelochenkova S.V., Guskova O.N., Bordin D.S. Clinical-endoscopic and morphological aspects of autoimmune gastritis. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2022; (4): 14–19 (in Russian). <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-200-4-14-19>
31. Kamada T., Maruyama Y., Monobe Y., Haruma K. Endoscopic features and clinical importance of autoimmune gastritis. *Digestive Endoscopy*. 2022; 34(4): 700–713. <https://doi.org/10.1111/den.14175>
32. Bachmann H., Starrenburg M.J.C., Molenaar D., Kleerebezem M., van Hylckama Vlieg J.E.T. Microbial domestication signatures of *Lactococcus lactis* can be reproduced by experimental evolution. *Genome Research*. 2012; 22(1): 115–124. <https://doi.org/10.1101/gr.121285.111>
33. Olmos J., Paniagua-Michel J. *Bacillus subtilis* a Potential Probiotic Bacterium to Formulate Functional Feeds for Aquaculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*. 2014; 6(7): 361–365.
34. Shevandova A.A. et al. Metabolic integration of the "gut — liver": theoretical basis of interaction and therapeutic prospects. *Medical news of the North Caucasus*. 2021; 16(2): 222–226. <https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16052>

35. 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>
36. Новикова В.П., Гурова М.М., Хавкин А.И. (ред.). Кишечная микробиота как регулятор работы органов и систем человека. Руководство для врачей. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2024; 344. ISBN 978-5-9704-8174-5 <https://doi.org/10.33029/9704-8174-5-IMR-2024-1-344>
37. Салехов С.А., Ефимова Н.А., Маратова А.М., Андриевский А.Н., Брюшков А.В. Патогенетические особенности оценки белоксинтезирующей функции печени при нормальных показателях белка в крови. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2011; 11(7): 114–116. <https://elibrary.ru/okcziz>
38. Suk K.T., Kim D.J. Gut microbiota: novel therapeutic target for nonalcoholic fatty liver disease. *Expert Review of Gastroenterology & Hepatology*. 2019; 13(3): 193–204. <https://doi.org/10.1080/17474124.2019.1569513>
39. Jellin J.M. et al. (eds.). Natural medicines comprehensive database. 10th ed. Stockton, CA: *Therapeutic Research Faculty*. 2007; xvi: 2304. ISBN 978-0978820534
40. Kwoji I.D., Aiyegoro O.A., Okpeku M., Adeleke M.A. Multi-Strain Probiotics: Synergy among Isolates Enhances Biological Activities. *Biology*. 2021; 10(4): 322. <https://doi.org/10.3390/biology10040322>
41. Romário Silva D., de Cássia Orlandi Sardi J., Pitangui N. de S., Roque S.M., da Silva A.C.B., Rosalen P.L. Probiotics as an alternative antimicrobial therapy: Current reality and future directions. *Journal of Functional Foods*. 2020; 73: 104080. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104080>
42. Шевченко Е.А. Такие разные гепатопротекторы. *VetPharma*. 2015; (2): 28–31. <https://elibrary.ru/tpkion>
43. Яковенко Э.П., Агафонова Н.А., Яковенко А.В., Иванов А.Н., Каграманова А.В. Агонист опиатных рецепторов тримебутин в терапии функциональных расстройств желчного пузыря и сфинктера Одди. *Лечащий врач*. 2014; (2): 56–60. <https://elibrary.ru/rvbnar>

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

35. 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>

36. Novikova V.P., Gurova M.M., Khavkin A.I. (eds.). Intestinal microbiota as a regulator of the work of human organs and systems. Guide for doctors. Moscow: *GEOTAR-Media*. 2024; 344 (in Russian). ISBN 978-5-9704-8174-5 <https://doi.org/10.33029/9704-8174-5-IMR-2024-1-344>

37. Salekhov S.A., Efimova N.A., Maratova A.M., Andrievsky A.N., Bryushkov A.V. Pathogenetic features of assessing the liver's protein-synthesizing function in the presence of normal blood protein levels. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*. 2011; 11(7): 114–116 (in Russian). <https://elibrary.ru/okcziz>

38. Suk K.T., Kim D.J. Gut microbiota: novel therapeutic target for nonalcoholic fatty liver disease. *Expert Review of Gastroenterology & Hepatology*. 2019; 13(3): 193–204. <https://doi.org/10.1080/17474124.2019.1569513>

39. Jellin J.M. et al. (eds.). Natural medicines comprehensive database. 10th ed. Stockton, CA: *Therapeutic Research Faculty*. 2007; xvi: 2304. ISBN 978-0978820534

40. Kwoji I.D., Aiyegoro O.A., Okpeku M., Adeleke M.A. Multi-Strain Probiotics: Synergy among Isolates Enhances Biological Activities. *Biology*. 2021; 10(4): 322. <https://doi.org/10.3390/biology10040322>

41. Romário Silva D., de Cássia Orlandi Sardi J., Pitangui N. de S., Roque S.M., da Silva A.C.B., Rosalen P.L. Probiotics as an alternative antimicrobial therapy: Current reality and future directions. *Journal of Functional Foods*. 2020; 73: 104080. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104080>

42. Shevchenko E.A. Different Hepatoprotectors. *VetPharma*. 2015; (2): 28–31 (in Russian). <https://elibrary.ru/tpkion>

43. Yakovenko E.P., Agafonova N.A., Yakovenko A.V., Ivanov A.N., Kagramanova A.V. The opioid receptor agonist three mebutin in the therapy of functional disorders of the gallbladder and sphincter of Oddi. *Lechaschi Vrach*. 2014; (2): 56–60 (in Russian). <https://elibrary.ru/rvbnar>

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. 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 619:618.7

Научный обзор



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-45-57

А.В. Устименко¹А.И. Абилов¹ ✉П.Л. Козменков²

¹Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Подольск, Московская обл., Россия

²ООО «Альта НН», Нижний Новгород, Россия

✉ ahmed.abilov@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Устименко А.В., Абилов А.И., Козменков П.Л.

Послеотельные отклонения у коров и первотелок и способы их коррекции

РЕЗЮМЕ

Представлен научный анализ современных зарубежных публикаций по изучению послеотельных отклонений у коров и первотелок и способов их коррекции. Учитывая, что отечественные публикации по данной теме находятся в свободном доступе, было решено подготовить обзор по проблемам на основании данных зарубежных статей.

В обзоре нашли свое отражение публикации, которые показывают, как этиологический фактор влияет на послеотельные отклонения у коров и первотелок. Обращено внимание на факторы, вызывающие различные послеотельные осложнения — гипокальцемию, кетоз, задержание последа, болезни матки, которые впоследствии снижают эффективность воспроизводства, молочную продуктивность, продуктивное долголетие в стадах. Основные меры профилактики этих отклонений на основании исследований зарубежных авторов описаны в данном обзоре.

Данный обзор позволяет читателям расширить познания по проблемам у животных после отела, а именно учитывать некоторые физиологические изменения, которые в той или иной степени могут стать причиной развития различных отклонений, а также позволит практикам применять методы профилактики и коррекции этих осложнений до развития тяжелых и необратимых последствий.

Ключевые слова: послеотельный период, кетоз, гипокальцемия, эндометрит, задержание последа, коррекция

Для цитирования: Устименко А.В., Абилов А.И., Козменков П.Л. Послеотельные отклонения у коров и первотелок и способы их коррекции. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 45–57.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-45-57>

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-45-57

Anna V. Ustimenko¹Ahmed I. Abilov¹ ✉Peter L. Kozmenkov²

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Podolsk, Moscow Region, Russia

²“Alta NN” LLC, Nizhny Novgorod, Russia

✉ ahmed.abilov@mail.ru

Received by the editorial office: 08.07.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Ustimenko A.V., Abilov A.I., Kozmenkov P.L.

Postpartum deviations in cows and first-calf heifers and methods for their correction

ABSTRACT

A scientific analysis of modern foreign publications on postpartum deviations in cows and first-calving heifers and methods for their correction was carried out. Considering that domestic publications on this topic are freely available, it was decided to prepare a review of the problems based on data from foreign articles.

The review reflects publications that show how the etiological factor affects postpartum abnormalities in cows and first-born heifers. Attention is drawn to the factors that cause various postpartum complications, such as hypocalcemia, ketosis, afterbirth retention, uterine diseases that subsequently reduce reproductive efficiency, milk production, and productive longevity in herds. The main preventive measures for these deviations based on research by foreign authors are described in this review.

This review allows readers to expand their knowledge of problems in animals after calving, namely, to take into account some physiological changes that, to one degree or another, can cause the development of various deviations, and will also allow practitioners to apply methods for the prevention and correction of these complications before the development of severe and irreversible consequences.

Key words: postpartum period, ketosis, hypocalcemia, endometritis, retained placenta, correction

For citation: Ustimenko A.V., Abilov A.I., Kozmenkov P.L. Postpartum deviations in cows and first-calf heifers and methods for their correction. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 45–57 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-45-57>

Введение/Introduction

Переход от поздней стадии беременности к лактации является сложным периодом для молочных коров. Успешный переходный период зависит от метаболической адаптации к новому физиологическому состоянию в ранней лактации и правильной поддержки потребностей коровы [1, 2]. В связи с сокращающимся сроком полезного хозяйственного использования коров [3] в стадах возникает необходимость заменять их первотелками, более тщательно подходить к проведению их отелов для достижения максимальных показателей сохранности и минимальных — заболеваемости [4].

Непосредственно период отела связан с угнетением иммунитета, снижением потребления корма и отрицательным энергетическим балансом, в результате чего до 50% молочных коров в этот период страдают от метаболических или инфекционных заболеваний [5, 6]. Исследователи [7] отмечают, что в течение послеродового периода примерно у трети коров наблюдается хотя бы одно клиническое заболевание (метрит, мастит, кетоз и др.). Кроме того, увеличенная послеродовая матка, заполненная остатками плаценты и лохиями, способствует размножению микробов и развитию маточных инфекций [8].

Все заболевания у коров могут влиять на эффективность производства: снижая продуктивность молока, ухудшая репродуктивную способность и сокращая продолжительность жизни молочной коровы за счет увеличения показателей выбраковки. Раннее выявление больных коров является важнейшей задачей в области охраны здоровья молочного стада [9].

Метаболические изменения, происходящие в организме животных после отела, особенно в условиях стресса, вызывают повышение концентрации кортикостероидов [10]. Так, концентрация кортизола и уровень холестерина в плазме были значительно повышены у коров с дистоцией ($p < 0,001$) и их телят ($p < 0,019$ и $p < 0,007$ соответственно) [11]. Преждевременная акушерская помощь приводит к высокой распространенности тяжелой дистоции и отрицательно влияет на послеродовое здоровье матери и жизнеспособность новорожденного теленка, поэтому выбор подходящего времени для помощи имеет первостепенное значение для благополучия как матери, так и ее потомства [12].

Для оценки энергетического баланса, здоровья и репродуктивных результатов у молочных коров в послеродовой период широко используется показатель упитанности — BCS [13, 14]. Его снижение при отеле связано с более низкой молочной продуктивностью и меньшей вероятностью беременности, тогда как повышение BCS при отеле может указывать на возникновение послеродовых метаболических заболеваний [15, 16]. У коров, которым не ограничивали потребление энергии до отела, в предродовой период отмечали гипергликемию, гиперинсулинемию и более высокий уровень циркулирующего лептина, после

чего в послеродовой период следовали более высокая гиперлипидемия и продукция кетоновых тел по сравнению с коровами, у которых потребление контролировалось или ограничивалось. У перекормленных коров это сочеталось с большим накоплением общего количества липидов в печени и большей частотой метаболических нарушений. Это исследование подтверждает важность контроля потребления энергии в предродовой период для предотвращения метаболической дисфункции в послеродовой период [17].

Самым большим достижением в области здоровья молочных коров за последние годы стал сдвиг парадигмы от лечения заболеваний к профилактике. Другим важным достижением стало более глубокое изучение заболеваний, а именно определение и описание их субклинических форм [18].

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 публикаций охватывает период с 1988 по 2024 год включительно.

Поиск потенциально релевантных статей производили по ключевым словам в трех электронных базах данных — Scopus, Sci-Hub и Elibrary.ru и поисковой системы «Академия Google». 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

Во время послеотельного периода значительно возрастает риск развития ряда патологических состояний, таких как гипокальциемия, задержка последа, воспалительные заболевания матки (метриты, эндометриты), а также нарушения обмена веществ, включая кетоз. Эти заболевания существенно снижают продуктивность животных и могут иметь длительные последствия для их репродуктивной функции.

Гипокальциемия (молочная лихорадка) — это метаболическое заболевание, вызванное низкой концентрацией кальция (Ca) в крови (≤ 2 ммоль/л) [19]. В среднем до 10% [20] молочных коров страдают от клинической гипокальциемии, при этом субклиническая форма этого метаболического нарушения может достигать 50% в зависимости от разных стад [21, 22]. Эти и другие исследования свидетельствуют о том, что коровы с субклинической гипокальциемией в 3–5 раз чаще страдают послеродовыми заболеваниями [23] и на 50% чаще удаляются из стада в начале лактации, чем коровы с нормокальциемией [24].

Роль Ca в мышечной функции имеет значительные последствия для нормального течения родов и работы желудочно-кишечного тракта коров в период отела. Внеклеточный Ca участвует в возбудимости нейронов и мышечных клеток [25]. Поддержание оптимального баланса Ca в первые несколько дней после родов может иметь первостепенное значение, так как сниженный его уровень в течение 24-часового периода у небеременных нелактующих коров нарушает функцию нейтрофилов *in vitro* [26]. Во время молочной лихорадки сокращение мышц и тонус желудочно-кишечной и сердечно-сосудистой систем не поддерживаются, это может привести к гибели животного [22].

Тяжелая гипокальциемия возникает, когда в крови коровы не поддерживается необходимая концентрация кальция, и приводит к таким клиническим признакам, как вялость, возбудимость, длительное лежачее положение, и, если ее не лечить, к смерти [27]. Кроме того, это заболевание увеличивает риск возникновения мастита, задержания последа, эндометрита, кетоза, смещения сычуга и задержку первой овуляции после отела [19].

Несколько недавних исследований показывают, что усиленные негативные последствия несет именно продолжительная низкая концентрация кальция в крови у новотельных коров. Это приводит к снижению (на 70%) шансов наступления будущей стельности до первого осеменения по сравнению с коровами, имеющими нормальные показатели кальция в этот период [28]. Субклиническая гипокальциемия задерживает первую течку после отела и снижает вероятность того, что коровы проявят признаки течки в течение первых 60 дней лактации [29].

Существует несколько способов инициировать предродовую регуляцию Ca с целью профилактики послеродовой гипокальциемии, таких как диеты с низким содержанием кальция, использование витамина D , парентеральное введение Ca и контроль катионно-анионного баланса — DCAD [30].

Использование дородовой диеты с низким содержанием кальция создает дефицит, который стимулирует секрецию паратиреоидного гормона. Такие диеты направлены исключительно на профилактику гипокальциемии за счет низкого содержания Ca . Они труднодостижимы, поскольку требуют скармливания менее 20 г Ca в день, что является сложной задачей на коммерческих молочных фермах. Эту диету возможно обеспечить за счет включения связывающих Ca веществ, чаще всего посредством введения цеолита или синтетического силиката натрия [31]. Однако исследования проводили на небольшом количестве коров, что может ставить под сомнение эффективность данной стратегии для крупных хозяйств.

Катионно-анионный баланс (КАБ) — DCAD (dietary cation-anion difference) [32]. Кормление

коров до отела кислотогенными рационами способствует поддержанию повышенного уровня кальция в крови, когда происходит синтез молозива и молока [33]. Кормление рационами с отрицательным КАБ (то есть от -50 до -200 мг-экв/кг СВ) приводит к частично компенсированному метаболическому ацидозу со снижением pH мочи и небольшим снижением pH крови [34].

Правильное включение так называемых анионных солей в рацион коров в предродовой период существенно снизило исторически высокую распространенность клинической гипокальциемии у коров в послеродовой период за последние несколько десятилетий [33, 34]. Механизмы, посредством которых предродовой отрицательный КАБ способствует улучшению гомеостаза кальция, полностью не выявлены, но существует несколько версий. Увеличение потока Ca из-за большей почечной экскреции до родов является одним из возможных объяснений улучшения послеродового состояния. Почечная экскреция Ca очень низкая у жвачных животных и не изменяется при ограниченном его поступлении в рацион [35].

Снижение pH канальцевой жидкости сопровождается небольшим увеличением доли ионизированного Ca в крови и увеличением его экскреции с мочой. Можно предположить, что почечная экскреция Ca может быть немедленно снижена снова, как только рацион переключается на положительный КАБ при отеле [36].

Другой способ, которым отрицательный КАБ, как полагают, готовит коров к лактации, — это повышение чувствительности тканей к паратиреоидному гормону. Основная теория объясняется тем, что при использовании рационов с отрицательным КАБ рецепторы паратиреоидного гормона становятся более чувствительными к нему [37]. В одном из исследований животным скармливали 2 рациона — с отрицательным и положительным КАБ, а после проводили инъекции паратиреоидного гормона. В результате повышенные уровни сывороточного Ca отмечены у животных, получавших рацион с отрицательным КАБ [38]. Похожее исследование было проведено в 2019 году [39], в котором получили аналогичные результаты.

Использование витамина D . Вопрос о статусе витамина D у молочных коров заключается в том, что сывороточные концентрации витамина D (25(OH) D) у молочных коров, которых кормят в соответствии с современными методами, указывают на то, что послеродовая гипокальциемия не является результатом недостаточного дополнительного витамина D_3 . Десятилетия экспериментов, посвященных витамину D и профилактике гипокальциемии, показали, что недостаточное поступление витамина D не является причиной гипокальциемии [30]. R.M. Rodney и соавт. [40] выявили неспособность дополнительного витамина $D_3 > 60\,000$ МЕ/день существенно увеличить сывороточный 25(OH) D — это указывает на то,

что дополнительный витамин $D_3 > 60\,000$ МЕ/день дает мало преимуществ и, следовательно, не является действенным методом профилактики гипокальциемии.

Парентеральное введение кальция. Инъекционные препараты, вводимые подкожно, хоть и увеличивают концентрацию Ca в крови, мало влияют на риск последующего развития заболевания, производство молока или репродуктивную функцию [41, 42]. Кроме того, некоторые авторы отмечали негативное влияние инъекционного Ca на его гомеостаз в организме коров [43, 44]. То есть развитие регистрировали развитие гипокальциемии примерно через 24 часа после введения внутривенного Ca сразу после отела коровам, у которых не было признаков клинической гипокальциемии. Схожий эффект наблюдали и при подкожном введении кальция [42].

Задержка плаценты (последа) — это патологическое состояние, определяемое как неспособность вытолкнуть плодные оболочки в течение 12–24 часов после родов [45, 46]. Важными признаками, связанным с задержанием последа, являются деградация, изменение цвета и свисание плодных оболочек с вульвы более чем через 24 часа после родов [47]. Основные факторы развития задержания последа — возраст коровы, дистоция (тяжелый отел), рождение двоен [48], мертворождение [49], а также аборт на поздних сроках [12, 50], нарушение функции печени [51].

Гипокальциемия может быть предрасполагающим фактором к развитию задержания [52]. В разных странах уровень распространения этого заболевания варьируется от 4 до 16% [53, 54]. В течение 6–9 часов после родов плодные оболочки, которые остаются в матке, начинают разрушаться и становятся подходящей питательной средой для различных бактерий. Эти бактерии первоначально вызывают острый послеродовой метрит, а затем клинический или субклинический эндометрит, который приводит к поздней инволюции матки и поздней регрессии желтого тела яичников после отела [55].

Средняя заболеваемость с задержанием последа у коров в Иране в течение года составила 12,3% (в диапазоне от 9,0 до 15,4%). Каждый случай значительно снижал надой молока, жира и белка у первотелок и взрослых коров ($p < 0,05$). Неблагоприятное воздействие этого послеродового отклонения на производство молока было намного выше у коров на ранней стадии лактации (то есть в группе 100-дневной лактации), чем у коров в середине или конце лактации. Однако показатели фертильности были в меньшей степени затронуты задержанием у первотелок по сравнению с коровами старше первой лактации. Среднее количество дней без телят увеличилось на $8,3 \pm 5,3$ и $19,8 \pm 7,1$ дня у первотелок и взрослых коров соответственно. Самые высокие финансовые потери

из-за задержания последа были связаны со снижением молочной продуктивности и низкой плодовитостью (38,5% и 28,5% от общей потери соответственно), что имело наибольший вклад у первотелок и коров [50].

При постановке диагноза «задержание последа» чаще всего используют системные антимикробные препараты [56]. Однако в некоторых хозяйствах до сих пор практикуют введение внутриматочных антибиотиков, которые, наоборот, могут блокировать отделение последа [57]. Помимо этого, исторически практикуется ручное удаление последа, однако эффективность и полезность такой процедуры научно не доказаны [58]. Ручное отделение может привести к более тяжелым инфекциям матки, поэтому в некоторых источниках оно описывается как вредное для животных [59, 60].

Основными пунктами профилактики задержания последа считается полноценное и физиологичное кормление животных в течение транзитного периода [61], а также профилактика гипокальциемии и недостатка витамина Е и селена [62, 63].

Болезни матки (метрит, эндометрит) — на молочных фермах от 5–25% [64] до 40% [65] дойных коров между 3-м и 14-м днями после отела могут страдать от метрита — воспаления стенки матки, характеризующегося зловонными выделениями из вульвы, которое сопровождается повышением температуры тела (острое течение) [64, 66]. Интересен факт: у коров с метритом, у которых не развивается лихорадка, и наблюдается аналогичное снижение надоев, регистрируют более высокие показатели излечения [67] и улучшение плодовитости по сравнению с коровами с метритом, у которых развивается лихорадка. По данным многих исследователей, развитию болезней матки, а также задержке плаценты способствует сниженная функциональная способность нейтрофилов [68–70].

Во всех исследованиях у животных наблюдали снижение активности нейтрофилов за 2 недели до отела, более низкое количество циркулирующих нейтрофилов во время отела либо снижение функции нейтрофилов (активность миелопероксидазы) непосредственно после отела, у которых впоследствии было диагностировано какое-либо заболевание матки, а после лечения отмечали усиление белкового обмена, повышение уровня глюкозы, ускорение инволюции с нормализацией соотношения $Ca:P$, кислотно-щелочное равновесие, что обеспечило восстановление функциональной активности полового аппарата [71].

Бактериальное загрязнение полости матки после отела является основной причиной развития метрита [72]. Знание разнообразия микробиоты матки может дать дополнительное представление о видах, связанных с репродуктивными расстройствами, и имеет решающее

значение для эффективных терапевтических вмешательств [73]. Имеются данные [74], показывающие микробный пейзаж при остром гнойно-катаральном эндометрите в хозяйствах РФ, где показано, что эндометриты вызывают ассоциации условно-патогенных микроорганизмов.

Эндометрит — воспаление эндометрия, слизистой оболочки матки [68], которое характеризуется гнойными выделениями из вульвы через 21 день после отела или позже, обычно без повышения температуры тела и имеющее хроническое течение [75]. Клинический эндометрит характеризуется наличием белых или бело-желтых слизисто-гнойных выделений из влагалища у коровы в послеродовом периоде, а субклинический эндометрит — воспалением эндометрия, но без видимых гнойных выделений [76].

Факторы риска развития болезней матки:

- кормление (избыток белка, недостаток витаминов и др.);
- сезон отела (влажная погода может пагубно сказываться на состоянии иммунной системы коров [77], а также нельзя исключать влияние теплового стресса [78]);
- возраст коровы (у взрослых коров снижена эластичность матки, инволюция матки происходит медленнее [12, 79], что может служить predisposing фактором к развитию послеродового метрита);
- аномальный отел (дистоция, мертворожденность) (при тяжелом отеле часто возникают травмы эндометрия, а акушерская помощь может способствовать проникновению бактерий в матку [66, 80]. Это особенно касается первотелок, так как у них более высокий процент развития дистоции при отеле [48]);
- задержание плаценты (как упоминалось ранее, остаточная часть плаценты служит благоприятной средой для развития бактерий в матке [48, 50]);
- метаболический стресс (отрицательный энергетический баланс после отела может приводить к развитию послеродовых заболеваний [81, 82]).

Одним из выявленных методов ранней диагностики метрита является определение количества циркулирующих концентраций гаптоглобина (*Hp*) [83, 84]. E.J. Williams и соавт. [85] показали, что бактериальное загрязнение просвета матки у крупного рогатого скота было связано с увеличением концентрации *Hp*. Гаптоглобин связывается с гемоглобином и, таким образом, подавляет бактериальную пролиферацию, снижая доступность железа. Хотя существует множество различных белков острой фазы, измерение *Hp* представляет особый интерес для обнаружения воспаления у крупного рогатого скота из-за его фактического отсутствия в сыворотке здоровых животных [86]. Однако в современных исследованиях показано, что чувствительность для выявления острого послеродового метрита путем измерения *Hp* у первородящих и взрослых коров на 5-й день

после отела составила всего 64% и 72% соответственно [87]. Поскольку гаптоглобин является индикатором неспецифического врожденного иммунного ответа, активируемого различными воспалительными поражениями, дополнительные переменные могут влиять на концентрацию *Hp* и снижать его чувствительность [86, 88]. Такое отсутствие специфичности можно рассматривать как предостережение против использования концентраций *Hp* в плазме для выявления больных коров [89].

Общая цель профилактики этих заболеваний заключается в поддержке и сохранении врожденной иммунной функции. Считается, что повышение иммунитета снижает риск того, что воспаление и бактериальное загрязнение после отела приведут к метриту или эндометриту [90]. Имеются данные, показывающие эффективность использования энрофлоксацина с суспензией аспарагиновой кислоты на уровне 87,5%, продолжительность времени от отела до первой охоты на 4 дня меньше, процент оплодотворения животных в первую охоту на 27,5% выше [91].

Проводится тестирование препаратов, которые не являются антибиотиками, с целью снижения возникающих послеродовых инфекций матки [92]. Еще одной их мер профилактики всех послеродовых заболеваний является профилактика возникающего отрицательного энергетического баланса, то есть рацион новотельных коров должен быть сбалансирован таким образом, чтобы покрывать метаболические затраты на поддержание жизни и продуктивности [93]. Помимо этого, как упоминалось ранее, метрит чаще всего развивается после задержания последа, особенно после его ручного удаления, несмотря на использование внутриматочных антибиотиков [94]. Следовательно, в этом случае мера профилактики — это снижение возникающих случаев задержания плаценты, а также корректное лечение зарегистрированных задержаний без ручного отделения. Кроме того, гигиена подстилки во время отела может влиять на частоту возникновения инфекций матки [95], то есть дезинфекция оборудования и постоянная смена подстилки между отелами могут свести эти заболевания к минимуму [96]. Однако ряд исследователей не подтвердили влияние гигиены на будущие инфекции матки [97].

Кетоз — метаболическое заболевание молочных коров, характеризующееся высоким содержанием кетоновых тел, то есть β -гидроксипантратата, ацетоацетата и ацетона в крови, моче и молоке, которое возникает в начале лактации [98]. Кетоновые тела — это группа органических химических веществ, которые являются промежуточными метаболитами жира. Они являются альтернативным продуктом окисления свободных жирных кислот в печени, а процесс их образования называется кетогенезом. Они возникают, когда организм получает энергию из молекул

жира, вместо того чтобы извлекать ее из глюкозы. Некоторые из молекул последней затем могут быть преобразованы в кетоновые тела [99].

Основной версией возникновения кетоза является дефицит энергии (в основном глюкозы) сразу после отела [98, 100, 101]. Низкие концентрации глюкозы в крови связаны с гипоинсулинемией, которая впоследствии запускает мобилизацию жирных кислот из жировой ткани, тем самым увеличивая образование кетоновых тел. В печени жирные кислоты либо окисляются до углекислого газа и кетоновых тел, либо повторно этерифицируются в триглицериды для хранения и включения в липопротеины низкой плотности. Избыточное накопление триглицеридов приводит к жировой дистрофии печени [102, 103].

Отрицательные последствия кетоза могут включать снижение надоев, ухудшение репродуктивной функции (например, бесплодие), высокий риск других послеотельных заболеваний, включая смещение сычуга, хромоту, мастит, метрит и задержание последа, а также более высокий уровень выбраковки в первые 60 дней [104].

Золотым стандартом для тестирования кетоза у молочных коров является измерение уровня β -гидроксibuтирата в крови [105, 106]. Существуют две основные классификации кетоза — в зависимости от концентрации кетоновых тел в крови и клинических признаков и в зависимости от этиологии и продолжительности.

По первой классификации [107] кетоз делят на клинический и субклинический. Субклинический связывают с концентрацией β -гидроксibuтирата $> 1,2$ ммоль/л [97, 108]. При этом состоянии не наблюдается характерных клинических признаков и у животных сохраняется аппетит. Клинический кетоз относится к случаям гиперкетонемии, сопровождающимся проявлением клинических признаков и гипогликемии, характеризуется концентрацией β -гидроксibuтирата в крови $\geq 3,0$ ммоль/л [109].

По второй классификации разделяется на кетоз I и II типа. Первичный кетоз (I типа) является классической формой, которая возникает между 3 и 6 неделями после отела, когда максимальное количество энергии тратится на производство молока [110]. Он соответствует сахарному диабету I типа у людей. Коровы с кетозом I типа испытывают гипоинсулинемию во время диагностики гиперкетонемии и хронической гипогликемии из-за нехватки предшественников глюкозы для производства молока [98, 110]. Кетоз II типа чаще всего диагностируется через несколько дней после отела. Обычно это связано со слабым покрытием потребности в энергии из-за недостаточного количества сухого вещества. Отсутствие аппетита в этот период вызвано перекармливанием (синдром жирной коровы). Кетоз I и II типов, особенно в субклинической форме, является наиболее распространенным в настоящее время нарушением обмена веществ у молочных коров [111].

Зная, что кетоз в большинстве случаев возникает из-за энергетического дисбаланса, крайне важно инвестировать в профилактику, отслеживая наиболее разумные и слабые моменты продуктивной жизни коровы [112]. Экономические стратегии профилактики или смягчения последствий должны приниматься в соответствии с условиями, характерными для стада и страны.

В большом обзорном исследовании J.M. Cainzos и соавт. [113] показатели затрат на кетоз, представленные в различных экономических исследованиях, всегда следует тщательно рассматривать и интерпретировать в свете исходных данных для оценки и реалий стада. Однако независимо от оценок во всех исследованиях сообщается, что кетоз оказывает существенное негативное экономическое воздействие на молочную отрасль.

Коровы с кетозом I типа обычно хорошо реагируют на различные методы лечения. Ключ к предотвращению кетоза I типа — максимизировать потребление энергии в начале лактации. В некоторых стадах это может быть так же просто, как скормливание большего количества концентрированных кормов в начале лактации [110]. Глюкоза (или соединения, которые могут быть преобразованы в глюкозу) способна снизить уровень кетонов в крови после внутривенного введения. Пропиленгликоль дают в виде перорального вливания для снижения уровня неэтерифицированных жирных кислот в крови и тяжести жировой дистрофии печени при отеле или уровня кетонов в крови после отела [114, 115].

В определенных ситуациях кортикостероиды, такие как дексаметазон, можно использовать для стимуляции метаболической активности и повышения аппетита, хотя этот подход менее распространен. Однако профилактические стратегии часто более эффективны, чем лечение, фокусируясь на управлении рационами, мониторинге состояния тела, минимизации стресса и раннем выявлении [116].

Выводы/Conclusions

Общие способы коррекции для всех послеродовых заболеваний коров

После изучения большого количества статей общими стратегиями профилактики всех болезней послеродового периода у молочного скота стали:

1. Контроль рационов в транзитный период (катионно-анионный баланс до отела, достаточное количество энергии — после отела) [52].
2. Поддержка нормального уровня кальция [52].
3. Контроль упитанности (стандарт BCS между 3,0 и 3,25) [15].
4. Снижение любых стресс факторов: перегоны, работа ветврачей [117], влияние теплового стресса [118].

Дополнительно начали появляться более современные методы наблюдения и контроля за состоянием животных, а именно были разработаны

автоматизированные датчики, обнаруживающие проблемы со здоровьем у дойных коров, в том числе электропроводность и температура молока, активность и pH-метры рубца [119]. В некоторых исследованиях сообщают о высокой чувствительности и специфичности отдельных датчиков.

Проблемы с изменчивостью между коровами и фермами и выбором золотого стандарта, определяющего состояние здоровья, сохраняются, в то время как неопределенные соотношения затрат и пользы сенсорной технологии ставят под сомнение экономическую выгоду от внедрения.

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. Абилов А.И. (ред.). Некоторые аспекты воспроизводства крупного рогатого скота. СПб.: Проспект науки. 2019; 302. ISBN 978-5-906109-91-0 <https://elibrary.ru/mosbhn>
2. Caixeta L.S., Omontese B.O. Monitoring and Improving the Metabolic Health of Dairy Cows during the Transition Period. *Animals*. 2021; 11(2): 352. <https://doi.org/10.3390/ani11020352>
3. Стрекозов Н.И., Сивкин Н.И. Продуктивное долголетие коров при голштинизации черно-пестрого скота. *Генетика и разведение животных*. 2014; (2): 11–16. <https://elibrary.ru/umyhlp>
4. Фролова Е.М., Абилов А.И., Шамшидин А.С. Профилактика гинекологических заболеваний коров с использованием нового протокола и расчет эффективности его применения. *Генетика и разведение животных*. 2022; (1): 54–61. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2022-1-54-61>
5. LeBlanc S. Monitoring Metabolic Health of Dairy Cattle in the Transition Period. *Journal of Reproduction and Development*. 2010; 56(S): S29–S35. <https://doi.org/10.1262/jrd.1056S29>
6. Sordillo L.M. Nutritional strategies to optimize dairy cattle immunity. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(6): 4967–4982. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10354>
7. Ribeiro E.S., Carvalho M.R. Impact and mechanisms of inflammatory diseases on embryonic development and fertility in cattle. *Animal Reproduction*. 2018; 14(3): 589–600. <http://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1002>
8. Sheldon I.M., Cronin J., Goetze L., Donofrio G., Schuberth H.-J. Defining Postpartum Uterine Disease and the Mechanisms of Infection and Immunity in the Female Reproductive Tract in Cattle. *Biology of Reproduction*. 2009; 81(6): 1025–1032. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.109.077370>
9. Gröhn Y.T., Rajala-Schultz P.J., Allore H.G., DeLorenzo M.A., Hertl J.A., Galligan D.T. Optimizing replacement of dairy cows: modeling the effects of diseases. *Preventive Veterinary Medicine*. 2003; 61(1): 27–43. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(03\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(03)00158-2)
10. Mormède P. et al. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiology & Behavior*. 2007; 92(3): 317–339. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.12.003>
11. Civelek T., Celik H.A., Avci G., Cingi C.C. Effects of dystocia on plasma cortisol and cholesterol levels in Holstein heifers and their newborn calves. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy*. 2008; 52(4): 649–654.
12. Kovács L., Kézér F.L., Szenci O. Effect of calving process on the outcomes of delivery and postpartum health of dairy cows with unassisted and assisted calvings. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(9): 7568–7573. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11325>
13. Hoedemaker M., Prange D., Gundelach Y. Body Condition Change Ante- and Postpartum, Health and Reproductive Performance in German Holstein Cows. *Reproduction in Domestic Animals*. 2009; 44(2): 167–173. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00992.x>
14. Chebel R.C., Mendonça L.G.D., Baruselli P.S. Association between body condition score change during the dry period and postpartum health and performance. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(5): 4595–4614. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13732>
15. Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W., Stafford K.J., Berry D.P. *Invited review*: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science*. 2009; 92(12): 5769–5801. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2431>

REFERENCES

1. Abilov A.I. (ed.). Some aspects of cattle reproduction. St. Petersburg: Prospekt nauki. 2019; 302 (in Russian). ISBN 978-5-906109-91-0 <https://elibrary.ru/mosbhn>
2. Caixeta L.S., Omontese B.O. Monitoring and Improving the Metabolic Health of Dairy Cows during the Transition Period. *Animals*. 2021; 11(2): 352. <https://doi.org/10.3390/ani11020352>
3. Strekozov N.I., Sivkin N.I. Productive longevity of cows with Holsteinization of Black-and-White cattle. *Genetics and breeding of animals*. 2014; (2): 11–16 (in Russian). <https://elibrary.ru/umyhlp>
4. Frolova E.M., Abilov A.I., Shamshidin A.S. Prevention of gynecological diseases of cows using a new protocol and calculation of the effectiveness of its application. *Genetics and breeding of animals*. 2022; (1): 54–61 (in Russian). <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2022-1-54-61>
5. LeBlanc S. Monitoring Metabolic Health of Dairy Cattle in the Transition Period. *Journal of Reproduction and Development*. 2010; 56(S): S29–S35. <https://doi.org/10.1262/jrd.1056S29>
6. Sordillo L.M. Nutritional strategies to optimize dairy cattle immunity. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(6): 4967–4982. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10354>
7. Ribeiro E.S., Carvalho M.R. Impact and mechanisms of inflammatory diseases on embryonic development and fertility in cattle. *Animal Reproduction*. 2018; 14(3): 589–600. <http://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1002>
8. Sheldon I.M., Cronin J., Goetze L., Donofrio G., Schuberth H.-J. Defining Postpartum Uterine Disease and the Mechanisms of Infection and Immunity in the Female Reproductive Tract in Cattle. *Biology of Reproduction*. 2009; 81(6): 1025–1032. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.109.077370>
9. Gröhn Y.T., Rajala-Schultz P.J., Allore H.G., DeLorenzo M.A., Hertl J.A., Galligan D.T. Optimizing replacement of dairy cows: modeling the effects of diseases. *Preventive Veterinary Medicine*. 2003; 61(1): 27–43. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(03\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(03)00158-2)
10. Mormède P. et al. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiology & Behavior*. 2007; 92(3): 317–339. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.12.003>
11. Civelek T., Celik H.A., Avci G., Cingi C.C. Effects of dystocia on plasma cortisol and cholesterol levels in Holstein heifers and their newborn calves. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy*. 2008; 52(4): 649–654.
12. Kovács L., Kézér F.L., Szenci O. Effect of calving process on the outcomes of delivery and postpartum health of dairy cows with unassisted and assisted calvings. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(9): 7568–7573. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11325>
13. Hoedemaker M., Prange D., Gundelach Y. Body Condition Change Ante- and Postpartum, Health and Reproductive Performance in German Holstein Cows. *Reproduction in Domestic Animals*. 2009; 44(2): 167–173. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00992.x>
14. Chebel R.C., Mendonça L.G.D., Baruselli P.S. Association between body condition score change during the dry period and postpartum health and performance. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(5): 4595–4614. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13732>
15. Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W., Stafford K.J., Berry D.P. *Invited review*: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science*. 2009; 92(12): 5769–5801. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2431>

16. Pérez-Báez J. *et al.* Investigating the Use of Dry Matter Intake and Energy Balance Prepartum as Predictors of Digestive Disorders Postpartum. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 645252. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.645252>
17. Janovick N.A., Boisclair Y.R., Drackley J.K. Prepartum dietary energy intake affects metabolism and health during the periparturient period in primiparous and multiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2011; 94(3): 1385–1400. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3303>
18. LeBlanc S.J., Lissemore K.D., Kelton D.F., Duffield T.F., Leslie K.E. Major Advances in Disease Prevention in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(4): 1267–1279. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72195-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72195-6)
19. Seifi H.A., Kia S. Subclinical Hypocalcemia in Dairy Cows: Pathophysiology, Consequences and Monitoring. *Iranian Journal of Veterinary Science and Technology*. 2017; 9(2): 1–15. <https://doi.org/10.22067/veterinary.v9i2.69198>
20. Bhanugopan M.S., Lievaart J. Survey on the occurrence of milk fever in dairy cows and the current preventive strategies adopted by farmers in New South Wales, Australia. *Australian Veterinary Journal*. 2014; 92(6): 200–205. <https://doi.org/10.1111/avj.12183>
21. Houe H. *et al.* Milk fever and subclinical hypocalcaemia — An evaluation of parameters on incidence risk, diagnosis, risk factors and biological effects as input for a decision support system for disease control. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2001; 42(1): 1–29.
22. Reinhardt T.A., Lippolis J.D., McCluskey B.J., Goff J.P., Horst R.L. Prevalence of subclinical hypocalcemia in dairy herds. *The Veterinary Journal*. 2011; 188(1): 122–124. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2010.03.025>
23. Семенов В.Г. и др. Профилактика субклинических форм кетоза и гипокальциемии молочных коров. *Аграрная наука*. 2022; (11): 29–35. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-29-35>
24. Venjakob P.L., Pieper L., Heuwieser W., Borchardt S. Association of postpartum hypocalcemia with early-lactation milk yield, reproductive performance, and culling in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(10): 9396–9405. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14202>
25. Han P., Trinidad B.J., Shi J. Hypocalcemia-Induced Seizure: Demystifying the Calcium Paradox. *ASN Neuro*. 2015; 7(2): 1759091415578050. <https://doi.org/10.1177/1759091415578050>
26. Martinez N. *et al.* Effect of induced subclinical hypocalcemia on physiological responses and neutrophil function in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(2): 874–887. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7408>
27. Oetzel G.R. Monitoring and testing dairy herds for metabolic disease. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2004; 20(3): 651–674. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2004.06.006>
28. Caixeta L.S., Ospina P.A., Capel M.B., Nydam D.V. Association between subclinical hypocalcemia in the first 3 days of lactation and reproductive performance of dairy cows. *Theriogenology*. 2017; 94: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.01.039>
29. Rodríguez E.M., Aris A., Bach A. Associations between subclinical hypocalcemia and postparturient diseases in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(9): 7427–7434. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12210>
30. Wilkens M.R., Nelson C.D., Hernandez L.L., McArt J.A. *Symposium review: Transition cow calcium homeostasis—Health effects of hypocalcemia and strategies for prevention.* *Journal of Dairy Science*. 2020; 103(3): 2909–2927. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17268>
31. Kerwin A.L. *et al.* Effects of feeding synthetic zeolite A during the prepartum period on serum mineral concentration, oxidant status, and performance of multiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(6): 5191–5207. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16272>
32. Lean I.J., DeGaris P.J., Celi P., McNeill D.M., Rodney R.M., Fraser D.R. Influencing the future: interactions of skeleton, energy, protein and calcium during late gestation and early lactation. *Animal Production Science*. 2014; 54(9): 1177–1189. <https://doi.org/10.1071/AN14479>
33. Lean I.J., DeGaris P.J., McNeil D.M., Block E. Hypocalcemia in Dairy Cows: Meta-analysis and Dietary Cation Anion Difference Theory Revisited. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(2): 669–684. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72130-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72130-0)
34. Santos J.E.P., Lean I.J., Golder H., Block E. Meta-analysis of the effects of prepartum dietary cation-anion difference on performance and health of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(3): 2134–2154. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14628>
16. Pérez-Báez J. *et al.* Investigating the Use of Dry Matter Intake and Energy Balance Prepartum as Predictors of Digestive Disorders Postpartum. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 645252. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.645252>
17. Janovick N.A., Boisclair Y.R., Drackley J.K. Prepartum dietary energy intake affects metabolism and health during the periparturient period in primiparous and multiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2011; 94(3): 1385–1400. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3303>
18. LeBlanc S.J., Lissemore K.D., Kelton D.F., Duffield T.F., Leslie K.E. Major Advances in Disease Prevention in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(4): 1267–1279. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72195-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72195-6)
19. Seifi H.A., Kia S. Subclinical Hypocalcemia in Dairy Cows: Pathophysiology, Consequences and Monitoring. *Iranian Journal of Veterinary Science and Technology*. 2017; 9(2): 1–15. <https://doi.org/10.22067/veterinary.v9i2.69198>
20. Bhanugopan M.S., Lievaart J. Survey on the occurrence of milk fever in dairy cows and the current preventive strategies adopted by farmers in New South Wales, Australia. *Australian Veterinary Journal*. 2014; 92(6): 200–205. <https://doi.org/10.1111/avj.12183>
21. Houe H. *et al.* Milk fever and subclinical hypocalcaemia — An evaluation of parameters on incidence risk, diagnosis, risk factors and biological effects as input for a decision support system for disease control. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2001; 42(1): 1–29.
22. Reinhardt T.A., Lippolis J.D., McCluskey B.J., Goff J.P., Horst R.L. Prevalence of subclinical hypocalcemia in dairy herds. *The Veterinary Journal*. 2011; 188(1): 122–124. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2010.03.025>
23. Semenov V.G. *et al.* Prevention of subclinical forms of ketosis and hypocalcemia in dairy cows. *Agrarian science*. 2022; (11): 29–35 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-29-35>
24. Venjakob P.L., Pieper L., Heuwieser W., Borchardt S. Association of postpartum hypocalcemia with early-lactation milk yield, reproductive performance, and culling in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(10): 9396–9405. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14202>
25. Han P., Trinidad B.J., Shi J. Hypocalcemia-Induced Seizure: Demystifying the Calcium Paradox. *ASN Neuro*. 2015; 7(2): 1759091415578050. <https://doi.org/10.1177/1759091415578050>
26. Martinez N. *et al.* Effect of induced subclinical hypocalcemia on physiological responses and neutrophil function in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(2): 874–887. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7408>
27. Oetzel G.R. Monitoring and testing dairy herds for metabolic disease. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2004; 20(3): 651–674. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2004.06.006>
28. Caixeta L.S., Ospina P.A., Capel M.B., Nydam D.V. Association between subclinical hypocalcemia in the first 3 days of lactation and reproductive performance of dairy cows. *Theriogenology*. 2017; 94: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.01.039>
29. Rodríguez E.M., Aris A., Bach A. Associations between subclinical hypocalcemia and postparturient diseases in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(9): 7427–7434. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12210>
30. Wilkens M.R., Nelson C.D., Hernandez L.L., McArt J.A. *Symposium review: Transition cow calcium homeostasis—Health effects of hypocalcemia and strategies for prevention.* *Journal of Dairy Science*. 2020; 103(3): 2909–2927. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17268>
31. Kerwin A.L. *et al.* Effects of feeding synthetic zeolite A during the prepartum period on serum mineral concentration, oxidant status, and performance of multiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(6): 5191–5207. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16272>
32. Lean I.J., DeGaris P.J., Celi P., McNeill D.M., Rodney R.M., Fraser D.R. Influencing the future: interactions of skeleton, energy, protein and calcium during late gestation and early lactation. *Animal Production Science*. 2014; 54(9): 1177–1189. <https://doi.org/10.1071/AN14479>
33. Lean I.J., DeGaris P.J., McNeil D.M., Block E. Hypocalcemia in Dairy Cows: Meta-analysis and Dietary Cation Anion Difference Theory Revisited. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(2): 669–684. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72130-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72130-0)
34. Santos J.E.P., Lean I.J., Golder H., Block E. Meta-analysis of the effects of prepartum dietary cation-anion difference on performance and health of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(3): 2134–2154. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14628>

35. Herm G., Muscher-Banse A.S., Breves G., Schröder B., Wilkens M.R. Renal mechanisms of calcium homeostasis in sheep and goats. *Journal of Animal Science*. 2015; 93(4): 1608–1621. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8450>
36. Zimpel R. *et al.* Effect of dietary cation-anion difference on acid-base status and dry matter intake in dry pregnant cows. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(9): 8461–8475. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14748>
37. Disthabanchong S., Martin K.J., McConkey C.L., Gonzalez E.A. Metabolic acidosis up-regulates PTH/PTHrP receptors in UMR 106-01 osteoblast-like cells. *Kidney International*. 2002; 62(4): 1171–1177. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1755.2002.kid568.x>
38. Goff J.P., Liesegang A., Horst R.L. Diet-induced pseudohypoparathyroidism: A hypocalcemia and milk fever risk factor. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(3): 1520–1528. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7467>
39. Vieira-Neto A. *et al.* Effect of duration of exposure to diets differing in dietary cation-anion difference on Ca metabolism after a parathyroid hormone challenge in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(1): 1018–1038. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19127>
40. Rodney R.M. *et al.* Effects of prepartum dietary cation-anion difference and source of vitamin D in dairy cows: Vitamin D, mineral, and bone metabolism. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(3): 2519–2543. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13737>
41. Miltenburg C.L., Duffield T.F., Bienzle D., Scholtz E.L., LeBlanc S.J. Randomized clinical trial of a calcium supplement for improvement of health in dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(8): 6550–6562. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10961>
42. Domino A.R., Korzec H.C., McArt J.A.A. Field trial of 2 calcium supplements on early lactation health and production in multiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(12): 9681–9690. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12885>
43. Blanc C.D., Van der List M., Aly S.S., Rossow H.A., Silva-del-Rio N. Blood calcium dynamics after prophylactic treatment of subclinical hypocalcemia with oral or intravenous calcium. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(11): 6901–6906. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7927>
44. Wilms J., Wang G., Doelman J., Jacobs M., Martin-Tereso J. Intravenous calcium infusion in a calving protocol disrupts calcium homeostasis compared with an oral calcium supplement. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(7): 6056–6064. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15754>
45. Laven R.A., Peters A.R. Bovine retained placenta: aetiology, pathogenesis and economic loss. *Veterinary Record*. 1996; 139(19): 465–471. <https://doi.org/10.1136/vr.139.19.465>
46. Amin Y.A., Hussein H.A. Latest update on predictive indicators, risk factors and 'Omic' technologies research of retained placenta in dairy cattle — A review. *Reproduction in Domestic Animals*. 2022; 57(7): 687–700. <https://doi.org/10.1111/rda.14115>
47. Dervishi E., Zhang G., Hailemariam D., Dunn S.M., Ametaj B.N. Occurrence of retained placenta is preceded by an inflammatory state and alterations of energy metabolism in transition dairy cows. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2016; 7: 26. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0085-9>
48. Ghavi Hosseini-Zadeh N., Ardalan M. Cow-specific risk factors for retained placenta, metritis and clinical mastitis in Holstein cows. *Veterinary Research Communications*. 2011; 35(6): 345–354. <https://doi.org/10.1007/s11259-011-9479-5>
49. Bicalho R.C., Galvão K.N., Cheong S.H., Gilbert R.O., Warnick L.D., Guard C.L. Effect of Stillbirths on Dam Survival and Reproduction Performance in Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(6): 2797–2803. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-504>
50. Mahnani A., Sadeghi-Sefidmazgi A., Ansari-Mahyari S., Ghorbani G.-R. Assessing the consequences and economic impact of retained placenta in Holstein dairy cattle. *Theriogenology*. 2021; 175: 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.08.036>
51. Бурков П.В., Щербakov П.Н., Ребезов М.Б. Использование препарата «Овостим-цт» при профилактике гепатозов и задержаний последа у коров после отела. *Аграрная наука*. 2022; (7–8): 44–48. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-44-48>
52. Melendez P., Donovan G.A., Risco C.A., Goff J.P. Plasma mineral and energy metabolite concentrations in dairy cows fed an anionic prepartum diet that did or did not have retained fetal membranes after parturition. *American Journal of Veterinary Research*. 2004; 65(8): 1071–1076. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.1071>
35. Herm G., Muscher-Banse A.S., Breves G., Schröder B., Wilkens M.R. Renal mechanisms of calcium homeostasis in sheep and goats. *Journal of Animal Science*. 2015; 93(4): 1608–1621. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8450>
36. Zimpel R. *et al.* Effect of dietary cation-anion difference on acid-base status and dry matter intake in dry pregnant cows. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(9): 8461–8475. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14748>
37. Disthabanchong S., Martin K.J., McConkey C.L., Gonzalez E.A. Metabolic acidosis up-regulates PTH/PTHrP receptors in UMR 106-01 osteoblast-like cells. *Kidney International*. 2002; 62(4): 1171–1177. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1755.2002.kid568.x>
38. Goff J.P., Liesegang A., Horst R.L. Diet-induced pseudohypoparathyroidism: A hypocalcemia and milk fever risk factor. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(3): 1520–1528. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7467>
39. Vieira-Neto A. *et al.* Effect of duration of exposure to diets differing in dietary cation-anion difference on Ca metabolism after a parathyroid hormone challenge in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(1): 1018–1038. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19127>
40. Rodney R.M. *et al.* Effects of prepartum dietary cation-anion difference and source of vitamin D in dairy cows: Vitamin D, mineral, and bone metabolism. *Journal of Dairy Science*. 2018; 101(3): 2519–2543. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13737>
41. Miltenburg C.L., Duffield T.F., Bienzle D., Scholtz E.L., LeBlanc S.J. Randomized clinical trial of a calcium supplement for improvement of health in dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 2016; 99(8): 6550–6562. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10961>
42. Domino A.R., Korzec H.C., McArt J.A.A. Field trial of 2 calcium supplements on early lactation health and production in multiparous Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2017; 100(12): 9681–9690. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12885>
43. Blanc C.D., Van der List M., Aly S.S., Rossow H.A., Silva-del-Rio N. Blood calcium dynamics after prophylactic treatment of subclinical hypocalcemia with oral or intravenous calcium. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(11): 6901–6906. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7927>
44. Wilms J., Wang G., Doelman J., Jacobs M., Martin-Tereso J. Intravenous calcium infusion in a calving protocol disrupts calcium homeostasis compared with an oral calcium supplement. *Journal of Dairy Science*. 2019; 102(7): 6056–6064. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15754>
45. Laven R.A., Peters A.R. Bovine retained placenta: aetiology, pathogenesis and economic loss. *Veterinary Record*. 1996; 139(19): 465–471. <https://doi.org/10.1136/vr.139.19.465>
46. Amin Y.A., Hussein H.A. Latest update on predictive indicators, risk factors and 'Omic' technologies research of retained placenta in dairy cattle — A review. *Reproduction in Domestic Animals*. 2022; 57(7): 687–700. <https://doi.org/10.1111/rda.14115>
47. Dervishi E., Zhang G., Hailemariam D., Dunn S.M., Ametaj B.N. Occurrence of retained placenta is preceded by an inflammatory state and alterations of energy metabolism in transition dairy cows. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2016; 7: 26. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0085-9>
48. Ghavi Hosseini-Zadeh N., Ardalan M. Cow-specific risk factors for retained placenta, metritis and clinical mastitis in Holstein cows. *Veterinary Research Communications*. 2011; 35(6): 345–354. <https://doi.org/10.1007/s11259-011-9479-5>
49. Bicalho R.C., Galvão K.N., Cheong S.H., Gilbert R.O., Warnick L.D., Guard C.L. Effect of Stillbirths on Dam Survival and Reproduction Performance in Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(6): 2797–2803. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-504>
50. Mahnani A., Sadeghi-Sefidmazgi A., Ansari-Mahyari S., Ghorbani G.-R. Assessing the consequences and economic impact of retained placenta in Holstein dairy cattle. *Theriogenology*. 2021; 175: 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.08.036>
51. Burkov P.V., Shcherbakov P.N., Rebezov M.B. The use of the drug "Ovostim-CT" in the prevention of hepatosis and retention of placenta in cows after calving. *Agrarian science*. 2022; (7–8): 44–48 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-44-48>
52. Melendez P., Donovan G.A., Risco C.A., Goff J.P. Plasma mineral and energy metabolite concentrations in dairy cows fed an anionic prepartum diet that did or did not have retained fetal membranes after parturition. *American Journal of Veterinary Research*. 2004; 65(8): 1071–1076. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.1071>

53. Goff J.P. Major Advances in Our Understanding of Nutritional Influences on Bovine Health. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(4): 1292–1301.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72197-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72197-X)
54. Han Y.-K., Kim I.-H. Risk factors for retained placenta and the effect of retained placenta on the occurrence of postpartum diseases and subsequent reproductive performance in dairy cows. *Journal of Veterinary Science*. 2005; 6(1): 53–59.
55. LeBlanc S.J. Interactions of Metabolism, Inflammation, and Reproductive Tract Health in the Postpartum Period in Dairy Cattle. *Reproduction in Domestic Animals*. 2012; 47(S5): 18–30.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2012.02109.x>
56. Drillich M., Mahlstedt M., Reichert U., Tenhagen B.A., Heuwieser W. Strategies to Improve the Therapy of Retained Fetal Membranes in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(2): 627–635.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72126-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72126-9)
57. Eiler H., Hopkins F.M. Bovine Retained Placenta: Effects of Collagenase and Hyaluronidase on Detachment of Placenta. *Biology of Reproduction*. 1992; 46(4): 580–585.
<https://doi.org/10.1095/biolreprod46.4.580>
58. Drillich M., Reichert U., Mahlstedt M., Heuwieser W. Comparison of Two Strategies for Systemic Antibiotic Treatment of Dairy Cows with Retained Fetal Membranes: Preventive vs. Selective Treatment. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(5): 1502–1508.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72217-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72217-2)
59. Bolinder A., Seguin B., Kindahl H., Bouley D., Otterby D. Retained fetal membranes in cows: Manual removal versus nonremoval and its effect on reproductive performance. *Theriogenology*. 1988; 30(1): 45–56.
[https://doi.org/10.1016/0093-691X\(88\)90262-2](https://doi.org/10.1016/0093-691X(88)90262-2)
60. Frazer G.S. A Rational Basis for Therapy in the Sick Postpartum Cow. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2005; 21(2): 523–568.
<https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2005.03.005>
61. Tucho T.T. Review on Retention of Placenta in Dairy Cows and it is Economic and Reproductive Impacts. *Journal of Natural Sciences Research*. 2017; 7(7): 28–37.
62. Allison R.D., Laven R.A. Effect of vitamin E supplementation on the health and fertility of dairy cows: a review. *Veterinary Record*. 2000; 147(25): 703–708.
<https://doi.org/10.1136/vr.147.25.703>
63. Bourne N., Laven R., Wathes D.C., Martinez T., McGowan M. A meta-analysis of the effects of Vitamin E supplementation on the incidence of retained foetal membranes in dairy cows. *Theriogenology*. 2007; 67(3): 494–501.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2006.08.015>
64. LeBlanc S.J. Review: Postpartum reproductive disease and fertility in dairy cows. *Animal*. 2023; 17(S1): 100781.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100781>
65. Galvão K.N. Uterine diseases in dairy cows: understanding the causes and seeking solutions. *Animal Reproduction*. 2013; 10(3): 228–238
66. Negasee K.A. Clinical Metritis and Endometritis in Dairy Cattle: A Review. *Veterinary Medicine - Open Journal*. 2020; 5(2): 51–56.
67. Giuliodori M.J., Magnasco R.P., Becu-Villalobos D., Lacau-Mengido I.M., Risco C.A., de la Sota R.L. Metritis in dairy cows: Risk factors and reproductive performance. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(6): 3621–3631.
<https://doi.org/10.3168/jds.2012-5922>
68. Hoebe D. *et al.* Chemiluminescence of bovine polymorphonuclear leucocytes during the periparturient period and relation with metabolic markers and bovine pregnancy-associated glycoprotein. *Journal of Dairy Research*. 2000; 67(2): 249–259.
<https://doi.org/10.1017/S0022029900004052>
69. Hammon D.S., Evjen I.M., Dhiman T.R., Goff J.P., Walters J.L. Neutrophil function and energy status in Holstein cows with uterine health disorders. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2006; 113(1–2): 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2006.03.022>
70. Moretti P., Probo M., Cantoni A., Paltrinieri S., Giordano A. Fluctuation of neutrophil counts around parturition in Holstein dairy cows with and without retained placenta. *Research in Veterinary Science*. 2016; 107: 207–212.
<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2016.06.015>
71. Григорьева Т.Е., Сергеева Н.С. Обмен веществ у коров, больных эндометритом. *Аграрная наука*. 2017; (5): 25–26.
<https://elibrary.ru/ysvnot>
72. Dohmen M.J.W., Joop K., Sturk A., Bols P.E.J., Lohuis J.A.C.M. Relationship between intra-uterine bacterial contamination, endotoxin levels and the development of endometritis in postpartum cows with dystocia or retained placenta. *Theriogenology*. 2000; 54(7): 1019–1032.
[https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(00\)00410-6](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00410-6)
53. Goff J.P. Major Advances in Our Understanding of Nutritional Influences on Bovine Health. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(4): 1292–1301.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72197-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72197-X)
54. Han Y.-K., Kim I.-H. Risk factors for retained placenta and the effect of retained placenta on the occurrence of postpartum diseases and subsequent reproductive performance in dairy cows. *Journal of Veterinary Science*. 2005; 6(1): 53–59.
55. LeBlanc S.J. Interactions of Metabolism, Inflammation, and Reproductive Tract Health in the Postpartum Period in Dairy Cattle. *Reproduction in Domestic Animals*. 2012; 47(S5): 18–30.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2012.02109.x>
56. Drillich M., Mahlstedt M., Reichert U., Tenhagen B.A., Heuwieser W. Strategies to Improve the Therapy of Retained Fetal Membranes in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(2): 627–635.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72126-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72126-9)
57. Eiler H., Hopkins F.M. Bovine Retained Placenta: Effects of Collagenase and Hyaluronidase on Detachment of Placenta. *Biology of Reproduction*. 1992; 46(4): 580–585.
<https://doi.org/10.1095/biolreprod46.4.580>
58. Drillich M., Reichert U., Mahlstedt M., Heuwieser W. Comparison of Two Strategies for Systemic Antibiotic Treatment of Dairy Cows with Retained Fetal Membranes: Preventive vs. Selective Treatment. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(5): 1502–1508.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72217-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72217-2)
59. Bolinder A., Seguin B., Kindahl H., Bouley D., Otterby D. Retained fetal membranes in cows: Manual removal versus nonremoval and its effect on reproductive performance. *Theriogenology*. 1988; 30(1): 45–56.
[https://doi.org/10.1016/0093-691X\(88\)90262-2](https://doi.org/10.1016/0093-691X(88)90262-2)
60. Frazer G.S. A Rational Basis for Therapy in the Sick Postpartum Cow. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2005; 21(2): 523–568.
<https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2005.03.005>
61. Tucho T.T. Review on Retention of Placenta in Dairy Cows and it is Economic and Reproductive Impacts. *Journal of Natural Sciences Research*. 2017; 7(7): 28–37.
62. Allison R.D., Laven R.A. Effect of vitamin E supplementation on the health and fertility of dairy cows: a review. *Veterinary Record*. 2000; 147(25): 703–708.
<https://doi.org/10.1136/vr.147.25.703>
63. Bourne N., Laven R., Wathes D.C., Martinez T., McGowan M. A meta-analysis of the effects of Vitamin E supplementation on the incidence of retained foetal membranes in dairy cows. *Theriogenology*. 2007; 67(3): 494–501.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2006.08.015>
64. LeBlanc S.J. Review: Postpartum reproductive disease and fertility in dairy cows. *Animal*. 2023; 17(S1): 100781.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100781>
65. Galvão K.N. Uterine diseases in dairy cows: understanding the causes and seeking solutions. *Animal Reproduction*. 2013; 10(3): 228–238
66. Negasee K.A. Clinical Metritis and Endometritis in Dairy Cattle: A Review. *Veterinary Medicine - Open Journal*. 2020; 5(2): 51–56.
67. Giuliodori M.J., Magnasco R.P., Becu-Villalobos D., Lacau-Mengido I.M., Risco C.A., de la Sota R.L. Metritis in dairy cows: Risk factors and reproductive performance. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(6): 3621–3631.
<https://doi.org/10.3168/jds.2012-5922>
68. Hoebe D. *et al.* Chemiluminescence of bovine polymorphonuclear leucocytes during the periparturient period and relation with metabolic markers and bovine pregnancy-associated glycoprotein. *Journal of Dairy Research*. 2000; 67(2): 249–259.
<https://doi.org/10.1017/S0022029900004052>
69. Hammon D.S., Evjen I.M., Dhiman T.R., Goff J.P., Walters J.L. Neutrophil function and energy status in Holstein cows with uterine health disorders. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2006; 113(1–2): 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2006.03.022>
70. Moretti P., Probo M., Cantoni A., Paltrinieri S., Giordano A. Fluctuation of neutrophil counts around parturition in Holstein dairy cows with and without retained placenta. *Research in Veterinary Science*. 2016; 107: 207–212.
<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2016.06.015>
71. Grigorieva T.E., Sergeeva N.S. Metabolism at cows with endometritis. *Agrarian science*. 2017; (5): 25–26 (in Russian).
<https://elibrary.ru/ysvnot>
72. Dohmen M.J.W., Joop K., Sturk A., Bols P.E.J., Lohuis J.A.C.M. Relationship between intra-uterine bacterial contamination, endotoxin levels and the development of endometritis in postpartum cows with dystocia or retained placenta. *Theriogenology*. 2000; 54(7): 1019–1032.
[https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(00\)00410-6](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(00)00410-6)

73. Handelsman J. Metagenomics: Application of Genomics to Uncultured Microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2004; 68(4): 669–685. <https://doi.org/10.1128/mmbr.68.4.669-685.2004>
74. Луцый В.И., Солошенко Н.Ю., Нефедов А.М., Сибирцев В.Д., Руденко А.А., Руденко П.А. Микробный пейзаж при остром гнойно-катаральном послеродовом эндометрите у коров. *Аграрная наука*. 2024; (3): 66–71. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-66-71>
75. Abdel-Latif M.A. *et al.* Impact of Supplementing Propylene Glycol and Calcium Propionate to Primiparous Buffalo Cows During the Late Gestation and Early Lactation Period on Reproductive Performance and Metabolic Parameters. *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*. 2016; 51(1): 114–121. <https://doi.org/10.5455/ajvs.240341>
76. Нежданов А.Г., Шабунин С.В., Михалев В.И., Филин В.В., Скориков В.Н. Послеродовой метрит у молочных коров. *Ветеринария*. 2016; (8): 3–10. <https://elibrary.ru/wjczdn>
77. Adnane M., Kaidi R., Hanzen C., England G.C.W. Risk factors of clinical and subclinical endometritis in cattle: a review. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*. 2017; 41(1): 1–11. <https://doi.org/10.3906/vet-1603-63>
78. Dawod A., Min B.R. Effect of puerperal metritis on Holstein cows productive, reproductive variables and culling rates. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*. 2014; 9(3): 162–169. <https://doi.org/10.3844/ajavsp.2014.162.169>
79. Benzaquen M.E., Risco C.A., Archbald L.F., Melendez P., Thatcher M.-J., Thatcher W.W. Rectal Temperature, Calving-Related Factors, and the Incidence of Puerperal Metritis in Postpartum Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(6): 2804–2814. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-482>
80. Kumari S., Kumaresan A., Patbandha T.K., Ravi S.K. Risk Factors for Metritis and Its Effect on Productive and Reproductive Performance in Dairy Cattle and Buffaloes. *Agricultural Research*. 2016; 5(1): 72–80. <https://doi.org/10.1007/s40003-015-0183-5>
81. Yáñez U., Herradón P.G., Becerra J.J., Peña A.I., Quintela L.A. Relationship between Postpartum Metabolic Status and Subclinical Endometritis in Dairy Cattle. *Animals*. 2022; 12(3): 242. <https://doi.org/10.3390/ani12030242>
82. Лощинин С.О., Авдеенко В.С., Фирсов Г.М., Племяшов К.В., Никитин Г.С., Михалев В.И. Роль отрицательного энергетического баланса у коров после отела в патогенезе воспаления матки. *Международный вестник ветеринарии*. 2022; (1): 185–197. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.1.185>
83. Huzzey J.M., Duffield T.F., LeBlanc S.J., Veira D.M., Weary D.M., von Keyserlingk M.A.G. Short communication: Haptoglobin as an early indicator of metritis. *Journal of Dairy Science*. 2009; 92(2): 621–625. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1526>
84. Назаров М.В., Казаринов В.А. Факторы риска развития метрита у коров. *Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов. Сборник тезисов по материалам V Международной конференции. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина*. 2020; 25. <https://elibrary.ru/aqpgaa>
85. Williams E.J. *et al.* The relationship between uterine pathogen growth density and ovarian function in the postpartum dairy cow. *Theriogenology*. 2007; 68(4): 549–559. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.04.056>
86. Eckersall P.D. Recent advances and future prospects for the use of acute phase proteins as markers of disease in animals. *Revue de medecine veterinaire*. 2000; 151(7): 577–584.
87. Burfeind O., Sannmann I., Voigtsberger R., Heuwieser W. Receiver operating characteristic curve analysis to determine the diagnostic performance of serum haptoglobin concentration for the diagnosis of acute puerperal metritis in dairy cows. *Animal Reproduction Science*. 2014; 149(3–4): 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.07.020>
88. Ceciliani F., Ceron J.J., Eckersall P.D., Sauerwein H. Acute phase proteins in ruminants. *Journal of Proteomics*. 2012; 75(14): 4207–4231. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2012.04.004>
89. Nightingale C.R., Sellers M.D., Ballou M.A. Elevated plasma haptoglobin concentrations following parturition are associated with elevated leukocyte responses and decreased subsequent reproductive efficiency in multiparous Holstein dairy cows. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2015; 164(1–2): 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2014.12.016>
90. LeBlanc S.J., Osawa T., Dubuc J. Reproductive tract defense and disease in postpartum dairy cows. *Theriogenology*. 2011; 76(9): 1610–1618. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.07.017>
73. Handelsman J. Metagenomics: Application of Genomics to Uncultured Microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2004; 68(4): 669–685. <https://doi.org/10.1128/mmbr.68.4.669-685.2004>
74. Lutsay V.I., Soloshenko N.Yu., Nefedov A.M., Sibirtsev V.D., Rudenko A.A., Rudenko P.A. Microbial landscape in acute purulent-catarhal postpartum endometritis in cows. *Agrarian science*. 2024; (3): 66–71 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-380-3-66-71>
75. Abdel-Latif M.A. *et al.* Impact of Supplementing Propylene Glycol and Calcium Propionate to Primiparous Buffalo Cows During the Late Gestation and Early Lactation Period on Reproductive Performance and Metabolic Parameters. *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*. 2016; 51(1): 114–121. <https://doi.org/10.5455/ajvs.240341>
76. Nezhdanov A.G., Shabunin S.V., Mikhalev V.I., Filin V.V., Skorikov V.N. Postpartum metritis in dairy cows. *Veterinary medicine*. 2016; (8): 3–10 (in Russian). <https://elibrary.ru/wjczdn>
77. Adnane M., Kaidi R., Hanzen C., England G.C.W. Risk factors of clinical and subclinical endometritis in cattle: a review. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*. 2017; 41(1): 1–11. <https://doi.org/10.3906/vet-1603-63>
78. Dawod A., Min B.R. Effect of puerperal metritis on Holstein cows productive, reproductive variables and culling rates. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*. 2014; 9(3): 162–169. <https://doi.org/10.3844/ajavsp.2014.162.169>
79. Benzaquen M.E., Risco C.A., Archbald L.F., Melendez P., Thatcher M.-J., Thatcher W.W. Rectal Temperature, Calving-Related Factors, and the Incidence of Puerperal Metritis in Postpartum Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2007; 90(6): 2804–2814. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-482>
80. Kumari S., Kumaresan A., Patbandha T.K., Ravi S.K. Risk Factors for Metritis and Its Effect on Productive and Reproductive Performance in Dairy Cattle and Buffaloes. *Agricultural Research*. 2016; 5(1): 72–80. <https://doi.org/10.1007/s40003-015-0183-5>
81. Yáñez U., Herradón P.G., Becerra J.J., Peña A.I., Quintela L.A. Relationship between Postpartum Metabolic Status and Subclinical Endometritis in Dairy Cattle. *Animals*. 2022; 12(3): 242. <https://doi.org/10.3390/ani12030242>
82. Loshchinin S.O., Avdeenko V.S., Firsov G.M., Plemyashov K.V., Nikitin G.S., Mikhalev V.I. The role of a negative energy balance in cows after calving in the pathogenesis of uterine inflammation. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2022; (1): 185–197 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2022.1.185>
83. Huzzey J.M., Duffield T.F., LeBlanc S.J., Veira D.M., Weary D.M., von Keyserlingk M.A.G. Short communication: Haptoglobin as an early indicator of metritis. *Journal of Dairy Science*. 2009; 92(2): 621–625. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1526>
84. Nazarov M.V., Kazarinov V.A. Risk factors for metritis in cows. *Institutional transformations of the Russian agro-industrial complex in the context of global challenges. Collection of abstracts based on the materials of the V International Conference. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin*. 2020; 25 (in Russian). <https://elibrary.ru/aqpgaa>
85. Williams E.J. *et al.* The relationship between uterine pathogen growth density and ovarian function in the postpartum dairy cow. *Theriogenology*. 2007; 68(4): 549–559. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.04.056>
86. Eckersall P.D. Recent advances and future prospects for the use of acute phase proteins as markers of disease in animals. *Revue de medecine veterinaire*. 2000; 151(7): 577–584.
87. Burfeind O., Sannmann I., Voigtsberger R., Heuwieser W. Receiver operating characteristic curve analysis to determine the diagnostic performance of serum haptoglobin concentration for the diagnosis of acute puerperal metritis in dairy cows. *Animal Reproduction Science*. 2014; 149(3–4): 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.07.020>
88. Ceciliani F., Ceron J.J., Eckersall P.D., Sauerwein H. Acute phase proteins in ruminants. *Journal of Proteomics*. 2012; 75(14): 4207–4231. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2012.04.004>
89. Nightingale C.R., Sellers M.D., Ballou M.A. Elevated plasma haptoglobin concentrations following parturition are associated with elevated leukocyte responses and decreased subsequent reproductive efficiency in multiparous Holstein dairy cows. *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2015; 164(1–2): 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2014.12.016>
90. LeBlanc S.J., Osawa T., Dubuc J. Reproductive tract defense and disease in postpartum dairy cows. *Theriogenology*. 2011; 76(9): 1610–1618. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.07.017>

91. Красочко П.А., Снитко Т.В., Черных О.Ю. Повышение эффективности лечения коров, больных послеродовым эндометритом, с помощью аспарагиновой кислоты. *Аграрная наука*. 2021; (4S): 53–55. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-347-4-53-55>
92. Фролова Е.М., Абилов А.И., Ерин С.Н. Эффективность применения нового протокола для профилактики послеродовых осложнений у коров-первотелок голштинской породы. *Генетика и разведение животных*. 2020; (3): 91–98. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2020-3-91-98>
93. Hotamisligil G.S., Erbay E. Nutrient sensing and inflammation in metabolic diseases. *Nature Reviews Immunology*. 2008; 8(12): 923–934. <https://doi.org/10.1038/nri2449>
94. Majeed A.F., Aboud Q.M., Hassan M.S., Muhammad A.Y. Retained fetal membranes in Friesian-Holstein cows and effect of some treatment methods. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*. 2009; 23(S1): 5–8.
95. Opsomer G., de Kruif A. Metritis and endometritis in high yielding dairy cows. *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift*. 2009; 78: 2.
96. Gustafsson H., Kornmatitsuk B., Königsson K., Kindahl H. Peripartum and early post-partum in the cow physiology and pathology. *Medecin Veterinaire du Quebec*. 2004; 34(1–2): 64–65.
97. Potter T.J., Guitian J., Fishwick J., Gordon P.J., Sheldon I.M. Risk factors for clinical endometritis in postpartum dairy cattle. *Theriogenology*. 2010; 74(1): 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.01.023>
98. Zhang G., Ametaj B.N. Ketosis an Old Story Under a New Approach. *Dairy*. 2020; 1(1): 42–60. <https://doi.org/10.3390/dairy1010005>
99. Baticz O., Tömösközi S., Vida L. Concentrations of citrate and ketone bodies in cow's raw milk. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2002; 46(1–2): 93–104.
100. Knowlton K.F., Dawson T.E., Glenn B.P., Huntington G.B., Erdman R.A. Glucose Metabolism and Milk Yield of Cows Infused Abomasally or Ruminally with Starch. *Journal of Dairy Science*. 1998; 81(12): 3248–3258. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75889-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75889-8)
101. Ковалев С.П., Киселенко П.С., Трушкин В.А., Никитина А.А. Показатели крови у больных кетозом коров. *Актуальные проблемы инновационного развития животноводства. Международная научно-практическая конференция*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2019; 86–89. <https://elibrary.ru/lrzusy>
102. Bačić G., Karadjole T., Mačević N., Karadjole M. A brief review of etiology and nutritional prevention of metabolic disorders in dairy cattle. *Veterinarski arhiv*. 2007; 77(6): 567–577.
103. McDonald C.J., Blankenheim Z.J., Drewes L.R. Brain Endothelial Cells: Metabolic Flux and Energy Metabolism. Cader Z., Neuhaus W. (eds.). *Physiology, Pharmacology and Pathology of the Blood-Brain Barrier*. Cham: Springer. 2021; 59–79. https://doi.org/10.1007/164_2021_494
104. Raboisson D., Mounié M., Maigné E. Diseases, reproductive performance, and changes in milk production associated with subclinical ketosis in dairy cows: A meta-analysis and review. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(12): 7547–7563. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8237>
105. Đoković R. et al. Diagnosis of subclinical ketosis in dairy cows. *Biotechnology in Animal Husbandry*. 2019; 35(2): 111–125. <https://doi.org/10.2298/BAH1902111D>
106. Турлюн В.И. Внедрение экспресс-методов определения кетоза у коров в технологический процесс производства молока. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2019; 54: 97–102. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11097>
107. Benedet A., Manuelian C.L., Zidi A., Penasa M., De Marchi M. Invited review: β -hydroxybutyrate concentration in blood and milk and its associations with cow performance. *Animal*. 2019; 13(8): 1676–1689. <https://doi.org/10.1017/S175173111900034X>
108. Suthar V.S., Canelas-Raposo J., Deniz A., Heuwieser W. Prevalence of subclinical ketosis and relationships with postpartum diseases in European dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(5): 2925–2938. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6035>
109. Gordon J.L., LeBlanc S.J., Duffield T.F. Ketosis Treatment in Lactating Dairy Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2013; 29(2): 433–445. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.03.001>
110. Oetzel G.R. Herd-Level Ketosis — Diagnosis and Risk Factors. *Preconference Seminar 7C: Dairy Herd Problem Investigation Strategies: Transition Cow Troubleshooting*, American Association of Bovine Practitioners 40th Annual Conference. 2007; 67–91.
91. Krasochko P.A., Snitko T.V., Chernykh O.Yu. Increasing the efficiency of treatment of cows with post-birth endometritis using asparaginic acid. *Agrarian science*. 2021; (4S): 53–55 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-347-4-53-55>
92. Frolova E.M., Abilov A.I., Erin S.N. Cost-effectiveness implementation of the new protocol for prevention of after calving complications in first-calf heifers. *Genetics and breeding of animals*. 2020; (3): 91–98 (in Russian). <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2020-3-91-98>
93. Hotamisligil G.S., Erbay E. Nutrient sensing and inflammation in metabolic diseases. *Nature Reviews Immunology*. 2008; 8(12): 923–934. <https://doi.org/10.1038/nri2449>
94. Majeed A.F., Aboud Q.M., Hassan M.S., Muhammad A.Y. Retained fetal membranes in Friesian-Holstein cows and effect of some treatment methods. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*. 2009; 23(S1): 5–8.
95. Opsomer G., de Kruif A. Metritis and endometritis in high yielding dairy cows. *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift*. 2009; 78: 2.
96. Gustafsson H., Kornmatitsuk B., Königsson K., Kindahl H. Peripartum and early post-partum in the cow physiology and pathology. *Medecin Veterinaire du Quebec*. 2004; 34(1–2): 64–65.
97. Potter T.J., Guitian J., Fishwick J., Gordon P.J., Sheldon I.M. Risk factors for clinical endometritis in postpartum dairy cattle. *Theriogenology*. 2010; 74(1): 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.01.023>
98. Zhang G., Ametaj B.N. Ketosis an Old Story Under a New Approach. *Dairy*. 2020; 1(1): 42–60. <https://doi.org/10.3390/dairy1010005>
99. Baticz O., Tömösközi S., Vida L. Concentrations of citrate and ketone bodies in cow's raw milk. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2002; 46(1–2): 93–104.
100. Knowlton K.F., Dawson T.E., Glenn B.P., Huntington G.B., Erdman R.A. Glucose Metabolism and Milk Yield of Cows Infused Abomasally or Ruminally with Starch. *Journal of Dairy Science*. 1998; 81(12): 3248–3258. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75889-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75889-8)
101. Kovalev S.P., Kiselenko P.S., Trushkin V.A., Nikitina A.A. Blood counts in patients with ketosis cows. *Actual problems of innovative development of animal husbandry. International scientific and practical conference*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2019; 86–89 (in Russian). <https://elibrary.ru/lrzusy>
102. Bačić G., Karadjole T., Mačević N., Karadjole M. A brief review of etiology and nutritional prevention of metabolic disorders in dairy cattle. *Veterinarski arhiv*. 2007; 77(6): 567–577.
103. McDonald C.J., Blankenheim Z.J., Drewes L.R. Brain Endothelial Cells: Metabolic Flux and Energy Metabolism. Cader Z., Neuhaus W. (eds.). *Physiology, Pharmacology and Pathology of the Blood-Brain Barrier*. Cham: Springer. 2021; 59–79. https://doi.org/10.1007/164_2021_494
104. Raboisson D., Mounié M., Maigné E. Diseases, reproductive performance, and changes in milk production associated with subclinical ketosis in dairy cows: A meta-analysis and review. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(12): 7547–7563. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8237>
105. Đoković R. et al. Diagnosis of subclinical ketosis in dairy cows. *Biotechnology in Animal Husbandry*. 2019; 35(2): 111–125. <https://doi.org/10.2298/BAH1902111D>
106. Turlyun V.I. Implementing of express-methods for determining cows ketosis into the milk technology process. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2019; 54: 97–102 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-11097>
107. Benedet A., Manuelian C.L., Zidi A., Penasa M., De Marchi M. Invited review: β -hydroxybutyrate concentration in blood and milk and its associations with cow performance. *Animal*. 2019; 13(8): 1676–1689. <https://doi.org/10.1017/S175173111900034X>
108. Suthar V.S., Canelas-Raposo J., Deniz A., Heuwieser W. Prevalence of subclinical ketosis and relationships with postpartum diseases in European dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(5): 2925–2938. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6035>
109. Gordon J.L., LeBlanc S.J., Duffield T.F. Ketosis Treatment in Lactating Dairy Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. 2013; 29(2): 433–445. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.03.001>
110. Oetzel G.R. Herd-Level Ketosis — Diagnosis and Risk Factors. *Preconference Seminar 7C: Dairy Herd Problem Investigation Strategies: Transition Cow Troubleshooting*, American Association of Bovine Practitioners 40th Annual Conference. 2007; 67–91.

111. Guliński P. Ketone bodies — causes and effects of their increased presence in cows' body fluids: A review. *Veterinary World*. 2021; 14(6): 1492–1503.
<https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1492-1503>
112. Lei M.A.C., Simões J. Invited Review: Ketosis Diagnosis and Monitoring in High-Producing Dairy Cows. *Dairy*. 2021; 2(2): 303–325.
<https://doi.org/10.3390/dairy2020025>
113. Cainzos J.M., Andreu-Vazquez C., Guadagnini M., Rijpert-Duvivier A., Duffield T. A systematic review of the cost of ketosis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2022; 105(7): 6175–6195.
<https://doi.org/10.3168/jds.2021-21539>
114. Pickett M.M., Piepenbrink M.S., Overton T.R. Effects of Propylene Glycol or Fat Drench on Plasma Metabolites, Liver Composition, and Production of Dairy Cows During the Periparturient Period. *Journal of Dairy Science*. 2003; 86(6): 2113–2121.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73801-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73801-6)
115. McArt J.A.A., Nydam D.V., Ospina P.A., Oetzel G.R. A field trial on the effect of propylene glycol on milk yield and resolution of ketosis in fresh cows diagnosed with subclinical ketosis. *Journal of Dairy Science*. 2011; 94(12): 6011–6020.
<https://doi.org/10.3168/jds.2011-4463>
116. Saradhi K.P., Sandilya A., Sravya R.N.S., Vijayalakshmi P. Ketosis in dairy cattle: A comprehensive review. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*. 2024; 8(12): 1008–1015.
<https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i12Sm.3264>
117. Nordlund K.V. Creating the Physical Environment for Transition Cow Success. *American Association of Bovine Practitioners Conference Proceedings*. 2010; 43: 100–104.
<https://doi.org/10.21423/aabppro20104090>
118. West J.W. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2003; 86(6): 2131–2144.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
119. Rutten C.J., Velthuis A.G.J., Steeneveld W., Hogeveen H. Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(4): 1928–1952.
<https://doi.org/10.3168/jds.2012-6107>

ОБ АВТОРАХ

Анна Владимировна Устименко¹

аспирант
anna-ustimenko94@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3839-4469>

Ахмедага Имаш оглы Абилов¹

доктор биологических наук, профессор, заслуженный
деятель науки Российской Федерации, главный научный
сотрудник
ahmed.abilov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6236-8634>

Пётр Львович Козменков²

кандидат биологических наук,
руководитель отдела научного планирования
plk@altann.ru
<https://orcid.org/0009-0009-7504-348X>

¹Федеральный исследовательский центр
животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста,
пос. Дубровицы, 60, г. о. Подольск, Московская обл.,
142132, Россия

²ООО «Альта НН»,
ул. Невская, 19А, Нижний Новгород, 603009, Россия

111. Guliński P. Ketone bodies — causes and effects of their increased presence in cows' body fluids: A review. *Veterinary World*. 2021; 14(6): 1492–1503.
<https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1492-1503>
112. Lei M.A.C., Simões J. Invited Review: Ketosis Diagnosis and Monitoring in High-Producing Dairy Cows. *Dairy*. 2021; 2(2): 303–325.
<https://doi.org/10.3390/dairy2020025>
113. Cainzos J.M., Andreu-Vazquez C., Guadagnini M., Rijpert-Duvivier A., Duffield T. A systematic review of the cost of ketosis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2022; 105(7): 6175–6195.
<https://doi.org/10.3168/jds.2021-21539>
114. Pickett M.M., Piepenbrink M.S., Overton T.R. Effects of Propylene Glycol or Fat Drench on Plasma Metabolites, Liver Composition, and Production of Dairy Cows During the Periparturient Period. *Journal of Dairy Science*. 2003; 86(6): 2113–2121.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73801-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73801-6)
115. McArt J.A.A., Nydam D.V., Ospina P.A., Oetzel G.R. A field trial on the effect of propylene glycol on milk yield and resolution of ketosis in fresh cows diagnosed with subclinical ketosis. *Journal of Dairy Science*. 2011; 94(12): 6011–6020.
<https://doi.org/10.3168/jds.2011-4463>
116. Saradhi K.P., Sandilya A., Sravya R.N.S., Vijayalakshmi P. Ketosis in dairy cattle: A comprehensive review. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*. 2024; 8(12): 1008–1015.
<https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i12Sm.3264>
117. Nordlund K.V. Creating the Physical Environment for Transition Cow Success. *American Association of Bovine Practitioners Conference Proceedings*. 2010; 43: 100–104.
<https://doi.org/10.21423/aabppro20104090>
118. West J.W. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2003; 86(6): 2131–2144.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
119. Rutten C.J., Velthuis A.G.J., Steeneveld W., Hogeveen H. Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(4): 1928–1952.
<https://doi.org/10.3168/jds.2012-6107>

ABOUT THE AUTHORS

Anna Vladimirovna Ustimenko¹

Graduate Student
anna-ustimenko94@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3839-4469>

Ahmedaga Imash Abilov¹

Doctor of Biological Sciences, Professor,
Honored Scientist of the Russian Federation,
Chief Researcher
ahmed.abilov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6236-8634>

Peter Lvovich Kozmenkov²

Candidate of Biological Sciences,
Head of the Scientific Planning Department
plk@altann.ru
<https://orcid.org/0009-0009-7504-348X>

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry,
60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region,
142132, Russia

²Alta NN LLC,
19A Nevskaya Str., Nizhny Novgorod, 603009, Russia

А.С. Фомина ✉

П.В. Васильев

А.А. Крикунова

А.М. Ермаков

Донской государственный
технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия

✉ a_bogun@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.05.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Фомина А.С., Васильев П.В.,
Крикунова А.А., Ермаков А.М.

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-58-70

Anna S. Fomina ✉

Pavel V. Vasiliev

Anastasia A. Krikunova

Alexey M. Ermakov

Don State Technical University, Rostov-
on-Don, Russia

✉ a_bogun@mail.ru

Received by the editorial office: 21.05.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Fomina A.S., Vasiliev P.V., Krikunova A.A.,
Ermakov A.M.

Современные методы и средства оценки проблемного поведения собак-компаньонов: аналитический обзор

РЕЗЮМЕ

Потребность в разработке и применении комплексных методов анализа поведения собак-компаньонов связана с возможностью раннего выявления поведенческих признаков снижения благополучия. Проведение опросов и ретроспективный анализ данных могут показывать недостаточную точность. Визуальное наблюдение человеком в процессе анализа поведения сопровождается высокой трудоемкостью и вероятностью погрешности ввиду субъективности восприятия. С этой позиции более валидную информацию позволяет получить использование видеозаписей, датчиков двигательной активности и применение нейронных сетей для анализа данных. Проведенный анализ источников позволил выявить слабую разработанность в российской литературе возможности применения технологии искусственного интеллекта в анализе поведения животных. В связи с этим в данном обзоре освещается вопрос применения метода акселерометрии и систем компьютерного зрения для анализа уровня двигательной активности у собак. Выявление поведенческих паттернов и их динамика в заданный временной интервал могут быть использованы для оценки психоэмоционального состояния, уровня тревоги и стресса, особенностей взаимодействия с человеком, другими животными и поведения в разных ситуациях. Можно предполагать, что данный комплексный подход создаст возможность объективного выявления собак, имеющих нарушения поведения. В совокупности с анализом вокализаций это может предоставить более точную и подробную информацию о коммуникации собак, их психоэмоциональном состоянии, а также способствовать раннему выявлению неблагополучия.

Ключевые слова: искусственный интеллект в зоопсихологии, акселерометрия у собак, психологические тесты для собак, служебные собаки, собака-компаньон, тревожность и агрессия у собак, анализ поведения собак

Для цитирования: Фомина А.С., Васильев П.В., Крикунова А.А., Ермаков А.М. Современные методы и средства оценки проблемного поведения собак-компаньонов: аналитический обзор. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 58–70.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-58-70>

Modern methods and tools for assessing the problematic behavior of companion dogs: an analytical review

ABSTRACT

The need to develop and apply comprehensive methods for analyzing the behavior of companion dogs is associated with the possibility of early detection of behavioral signs of decreased well-being. Conducting surveys and retrospective data analysis may show insufficient accuracy. Visual observation by a person in the process of analyzing behavior is accompanied by high labor intensity and the probability of error due to the subjectivity of perception. From this perspective, the use of video recordings, sensors of motor activity, and the use of neural networks for data analysis can provide more valid information. The analysis revealed a weak understanding in the Russian literature of the possibility of using artificial intelligence technology in the analysis of animal behavior. In this regard, this review highlights the issue of using accelerometry and computer vision systems to analyze the level of motor activity in dogs. The identification of behavioral patterns and their dynamics in a given time interval can be used to assess the psychoemotional state, the level of anxiety and stress, the characteristics of interaction with humans, other animals and behavior in different situations. It can be assumed that this comprehensive approach will create an opportunity for the objective identification of dogs with behavioral disorders. Together with the analysis of vocalizations, this can provide more accurate and detailed information about the communication of dogs, their psycho-emotional state, and also contribute to the early detection of problems.

Key words: artificial intelligence in zoopsychology, accelerometry in dogs, psychological tests for dogs, service dogs, companion dog, anxiety and aggression in dogs, analysis of dog behavior

For citation: Fomina A.S., Vasiliev P.V., Krikunova A.A., Ermakov A.M. Modern methods and tools for assessing the problematic behavior of companion dogs: an analytical review. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 58–70 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-58-70>

Введение/Introduction

В настоящее время в мировой науке возрастает интерес к разработке объективных методов оценки поведения домашних собак-компаньонов¹. Распознавание активности животных (Animal Activity Recognition, AAR) представляет собой принципиально новую область научных исследований, объединяющую данные ветеринарной науки, зоопсихологии, этологии и алгоритмов глубокого обучения [1]. Важность раннего объективного выявления проблемного поведения связана в том числе с необходимостью диагностики как нарушений состояния здоровья, так и общего снижения уровня благополучия собак [2].

Не вызывает сомнений формирование в современной ветеринарии и зоопсихологии потребности в применении объективных технических решений для оценки психоэмоционального состояния домашних животных. Ранний и своевременный мониторинг признаков поведенческих проблем позволит вовремя применить подходы к ранней диагностике и скорректировать проблемы на начальных этапах. В некоторых случаях только поведенческие проявления отражают уровень неблагополучия животных (к примеру, случаи жестокого обращения без нанесения физических травм).

Применение набора устройств, регистрирующих проявления поведенческой активности, позволяет определять и моделировать психоэмоциональное состояние животных-компаньонов с учетом индивидуальных и породных особенностей [3]. Классическим подходом к сбору данных для мониторинга типов поведения животных является привлечение человека в качестве наблюдателей. Существенные недостатки данного подхода — его трудоемкость, а также риск избыточного вмешательства в жизнь животных, что может исказить полученные результаты. Применение автоматизированных систем, основанных на непрерывном дистанционном сборе данных с портативных датчиков, позволяет нивелировать данные недостатки без потери информации [4, 5].

Для отслеживания поведения собаки существует возможность применения технологии искусственного интеллекта, что создает возможность объективной оценки характера и движения собак в экспериментальной комнате, ее взаимодействиях с людьми и предметами [6]. В зарубежной литературе применение систем видеонаблюдения и видеоанализа для оценки состояния собак происходит при комплексной оценке благополучия собак при посещении ветеринарных клиник, а также эффективности применения противотревожных препаратов [7–9].

При этом объективная оценка видео с использованием систем компьютерного зрения в

литературе представлена крайне мало и в основном основана на визуальном анализе видео в отсроченном режиме с последующей экспертной оценкой. Если подходы, связанные с оценкой вариабельности сердечного ритма, поведенческих опросных тестов, являются внедренными в повседневную практику, то технические средства, связанные с оценкой показателей двигательной активности, в настоящее время используются слабо.

На основании этого можно утверждать, что высокую научную и практическую значимость приобретает создание подхода к выявлению и прогнозированию нарушений поведения собак, базирующегося на сочетании методов опроса владельцев, наблюдения за поведением животных, физиологических методов диагностики уровня напряженности систем адаптации, технологии искусственного интеллекта для анализа видеозаписей поведения. Решение задачи должно быть жестко регламентировано, экспериментальные ситуации стандартизированы и типичны именно для выявления индивидуальных черт поведения собаки и ее реакций. Такой подход является востребованным как для зарубежной, так и для российской науки, поскольку создаст возможность объективной, всесторонней диагностики и прогнозирования вероятности, причин и последствий нарушений поведения собак без применения дорогостоящих инвазивных методов, требующих специальной подготовки, оборудования, реактивов.

Необходимо отметить, что и в отечественной, и в зарубежной литературе недостаточно представлены исследования, связанные с использованием технологических систем при оценке поведения собак — как рабочих, так и компаньонов. Ограниченный объем публикаций по данной тематике наряду с существующим в обществе запросом на анализ благополучия собак, выявление и идентификацию типа проблемного поведения обуславливает актуальность подобных исследований.

Цели работы — анализ и систематизация представленных в научной литературе данных о возможности использования технических средств мониторинга для объективной оценки проблемного поведения собак.

На основании поставленной цели определены следующие задачи:

- проанализировать состояние вопроса применимости технических средств и современных поведенческих методов при оценке поведения собак в отечественной научной литературе;
- оценить возможность применения методов акселерометрии и видеофиксации поведения собак для выявления паттернов проблемного поведения;

¹ В данной статье под понятием «собака-компаньон» авторами подразумеваются домашние собаки, проживающие совместно с человеком. В зарубежных исследованиях данная роль собак обозначается понятием pet dogs. В функции собаки-компаньона входит обеспечение общения и эмоционального взаимодействия с владельцем; практические результаты совместной деятельности не являются обязательными. Данный термин используется авторами как определение именно функциональной роли, без привязки к классификации по FCI (9-я группа пород — компаньоны и декоративные собаки). Аналогичный смысл вкладывается авторами в понятие «животное-компаньон», учитывающие иные биологические виды.

- на основании проведенного анализа литературных источников обосновать подход к использованию поведенческих и технических методов для объективной оценки проблемного поведения собак.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В рамках исследования был проведен анализ литературных источников, представленных в базах научной рецензируемой литературы Elibrary, Pubmed (pubmed.ncbi.nlm.nih.gov), Science Direct, Google Academy. Отбирались полнотекстовые научные статьи и краткие сообщения, опубликованные на русском и английском языках с 2010 по 2024 г. Выбор временных рамок определен в предыдущих разработках на основании возрастающей актуальности темы исследования.

Отбор научных публикаций осуществляли по ключевым словам: искусственный интеллект в зоопсихологии, акселерометрия у собак, психологические тесты для собак, служебные собаки, собака-компаньон, тревожность и агрессия у собак, анализ поведения собак. При работе с зарубежными базами статей использовали аналогичные ключевые слова на английском языке.

Ключевые слова для отбора определялись на основании наиболее часто применяемых научных терминов в разработках, известных авторам настоящей статьи. Включение статей в анализ проводилось на основании экспертизы не менее двух авторов статьи.

В ходе подбора и анализа литературных источников ключевым аспектом был анализ современного состояния вопроса применимости поведенческих тестов, систем искусственного интеллекта и высокотехнологичных измерительных приборов для оценки и анализа поведения собак-компаньонов.

При первоначальном отборе во всех указанных базах были отобраны не менее 1500 источников. После исключения статей с недоступной полнотекстовой версией, а также не соответствующим целям анализа для написания обзора были отобраны 68 наиболее подходящих источников. Включение статей в анализ проводилось на основании экспертизы авторов статьи.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Современное состояние вопроса в Российской Федерации

Актуальность проводимого исследования была определена на основании анализа отечественных публикаций, представленных в базе РИНЦ за 2010–2024 гг. (более 500 записей) и посвященных методам объективной оценки и поведения собак. Научные исследования в Российской Федерации при решении вопросов применения программно-аппаратных средств, связанных с оценкой поведения собак, представлены

единичными разработками, не имеющими комплексного подхода к анализу проблемного поведения и сконцентрированными на других задачах и классических методах аверсивной дрессировки и условно-рефлекторного поведения. Кроме того, данные публикации представлены в виде тезисов в сборниках конференций, тогда как полнотекстовые статьи единичны.

Ряд исследований, опубликованных практикующими ветеринарными врачами и посвященных отклонениям поведения собак на приеме в ветеринарных клиниках, подтверждают имеющийся в профессиональном сообществе и у владельцев интерес к тематике исследования.

Проанализированные авторами научные разработки могут быть сгруппированы по следующим тематикам: служебное собаководство и подготовка рабочих собак [10–14]; особенности и методы адаптации и социализации собак [15–18].

Исследования, связанные с использованием технологии искусственного интеллекта как одного из средств оценки поведения домашних собак, в отечественной литературе не обнаружены.

Необходимо отметить, что большая часть проанализированных литературных источников касалась использования технологичных устройств для сельскохозяйственных животных, тогда как для собак-компаньонов подобные исследования представлены единичными публикациями. Данный вопрос приобретает особую актуальность для нашей страны, поскольку вопрос анализа свободного поведения животных-компаньонов разработан слабо, тогда как в зарубежной науке это направление является фронтиром [19–25].

В результате недостаточные знания о причинах проблемного поведения животных, высокая индивидуальная вариабельность поведенческих паттернов, разный подход практикующих специалистов, отсутствие учета взаимовлияния владельцев и животных создают крайне разнородную информацию о методах выявления и коррекции поведения животных-компаньонов [25–34]. Необходимо учитывать взаимосвязь длительно сохраняющейся тревожности собак с особенностями индивидуально-типологических свойств центральной нервной системы, спецификой взаимоотношений с владельцами, социализацией, состоянием здоровья (в частности, вероятностью хронического болевого синдрома), возрастом, породными особенностями.

В связи со слабой разработанностью данной проблематики в отечественной научной литературе и имеющихся запросов со стороны биологических и ветеринарных наук коллектив авторов статьи совместно с коллегами разрабатывает теоретические и практические аспекты подходов к оценке проблемного поведения домашних собак-компаньонов. В настоящее время имеются теоретические и прикладные разработки,

позволяющие проанализировать эмоциональное состояние животных на основе анализа спектров вокализаций [32, 33, 35].

В цикле разработок на основании анализа спектрограмм и интервалограмм лая предлагается методика классификации вокализации собак как маркера тревожности или агрессивного поведения. На основании собственных исследований созданы и запатентованы принципиальная и структурная схема устройства и алгоритм регистрации типа деятельности животного при вокализации. Предложена структурная и принципиальная схема устройства для регистрации вокализации собак.

Разрабатывается комплексный подход к оценке проблемного поведения собак-компаньонов с использованием технологии искусственного интеллекта [35]. Данный подход базируется на сочетании применении тестов-опросников для владельцев, методов акселерометрии, термографии и анализа видеозаписей с применением обученной нейронной сети YOLOv8. Комплексный метод показал свою эффективность для выявления и анализа объективных маркеров, позволяющих дифференцировать спокойных, тревожных и возбудимых собак.

Исследование специфики поведенческих методов, применяемых для домашних собак-компаньонов

Принятый в настоящее время подход к исследованию поведения домашних собак-компаньонов, оценке и выявлению поведенческих нарушений на основании одного конкретного метода не позволяет учесть все требуемые факторы, поскольку:

1) индивидуальные поведенческие черты конкретного животного, способ коммуникации с владельцем (проводником), незнакомым человеком, окружающей средой могут привести к существенному разбросу любого показателя при его одином анализе;

2) высокий уровень субъективности и неточности опросных тестов. Это определяется особенностями восприятия владельцем и экспертом поведения собаки, а также личным опытом. Анализ опросных тестов как ретроспективный анализ в ветеринарии и зоопсихологии имеет точность около 77%;

3) отсутствие видеофиксации поведения и его анализа с помощью экспертной оценки (вручную) и технологии искусственного интеллекта может привести к пропуску ранних поведенческих признаков дезадаптации животных;

4) использование технологии искусственного интеллекта без предварительной оценки анамнеза жизни, паттернов поведения, состояния здоровья и уровня адаптивности собаки не позволяет грамотно проинтерпретировать выявленные тенденции.

Многофакторный подход к изучению поведения может способствовать общему пониманию состояния собаки, выявлению признаков неблагополучия: физиологического, эмоционального, поведенческого, социального. Грамотная оценка свободного поведения животных с учетом медицинского анамнеза и анамнеза жизни, поведенческих тестов и опросников, физиологических показателей состояния, оценки поз, движений и мелких признаков повышенной тревожности [32, 33, 36]. Спецификой данной тематики является инициация исследований со стороны практического использования данных [35, 29, 37–44].

Активные и пассивные движения собак, стиль поведения, реакция на объекты и субъекты рассматриваются как валидный маркер для оценки состояния здоровья и уровня благополучия животных [2]. Доказана разнообразная представленность поведенческих нарушений у собак разных стран, что обусловлено популярностью определенных пород, социальным контекстом и отношением общества к животным-компаньонам [51–54, 56]. [39–42, 44].

Таблица 1. Сравнительный анализ методов оценки поведения собак

Table 1. Comparative analysis of dog behavior assessment methods

Метод	Преимущества	Недостатки	Применимость	Источники
Наблюдение человеком	Простота, доступность, возможность адаптации под индивидуальные особенности собаки	Субъективность, возможное искажение данных из-за человеческого фактора, трудоемкость	Подходит для небольших выборок и при отсутствии технического оборудования	[1, 2]
Видеофиксация	Точная регистрация поведения, возможность последующего анализа, автоматизация через компьютерное зрение	Требует видеокамер и программного обеспечения для анализа, требует стандартизации условий	Идеальна для долгосрочных наблюдений и анализа поведения в естественной среде	[3, 4, 6]
Опросные тесты	Удобство использования, минимальные затраты времени и ресурсов	Высокая субъективность, зависимость от восприятия владельца или эксперта, ограниченная точность	Полезны для предварительной оценки или в качестве дополнения к другим методам	[26, 27, 37, 38]
Акселерометрия	Объективная оценка уровня активности, возможность длительного мониторинга, малые размеры устройства	Ограниченная классификация поведения, нет возможности анализа сложных поведенческих паттернов	Подходит для оценки двигательной активности и выявления изменений в поведении	[5, 55]
Системы на основе ИИ	Высокая точность, автоматизация, возможность анализа больших объемов данных, поддержка анализа в реальном времени	Требует сложного программного обеспечения и мощных вычислительных ресурсов, высокая стоимость внедрения	Перспективны для автоматизированного анализа в реальном времени	[3, 4, 67]

Варианты поведения, доступные к оценке на основании наблюдения, опросников, шкал и видеозаписей, разделяют на 4 категории (табл. 2):

1. Возбужденное поведение: тревога и привлечение внимания, частое или тяжелое дыхание, активные движения, вздрагивания, ориентировочная реакция на звук.

2. Боязливое поведение: дрожь, скуление, арочная осанка, поджимание хвоста, попытка убежать, спрятаться или замереть.

3. Расслабленное поведение: спокойное бодрствование, виляние хвостом.

4. Иное поведение: зевота, лай, рычание, облизывание губ, попытки разгрызть предметы.

Отдельно можно выделить категорию «СДВГ-поведение», проявляющееся в избыточной двигательной активности и импульсивном поведении ввиду резкого снижения тормозного контроля.

Имеются исследования, связанные с применением определенных поведенческих дескрипторов собак для определения типа поведения именно по видеозаписям. В исследовании [45] выделены 15 дескрипторов, к которым отнесли скуку, тревогу, расслабленность, беспокойство, раздражение, ярость, доверчивость, энергичность и др. Валидными маркерами считаются бдительность и концентрация внимания, ориентировочная реакция на звук, вздрагивание, тремор, попытки спрятаться или убежать, а также более мелкие реакции (например, мигание, почесывание, облизывание носа) [46]. Чувствительными маркерами, анализируемыми по видеозаписям, являются прижатые уши, частота и глубина дыхания, скорость и длительность двигательной активности, моргание, вокализация и стремление спрятаться [47].

Тест «Открытое поле»² является классическим физиологическим методом оценки поведения животных, зарекомендовавшим себя для исследования двигательной активности, ориентировочной реакции, исследовательского поведения и уровня тревожности у лабораторных крыс на площадке, разделенной на сектора. Комплекс маркеров, используемых в данном тесте, включает повороты, движение животного вправо и влево, повороты головы, количество актов груминга, дефекации, длину траектории, среднюю скорость и время движения, остановки и замирания. Особенности теста — его высокая вариативность и адаптивность к поставленной задаче, видовой специфике морфологического строения и особенностям высшей нервной деятельности животных.

Для собак существуют варианты использования теста именно для оценки уровня тревожности (на примере лабрадоров) [49, 50]. В основе такого тестирования лежит оценка вероятности преждевременной реакции и нежелательных действий на площадке при свободном поведении и взаимодействии с человеком и предметом [51]. В тесте «Открытое поле» эффективным является изучение влияния позитивных и негативных ситуаций возбуждения, присутствия знакомых и незнакомых людей на поведение и мимику собак. В исследовании [52] показана корреляция положительных эмоций собаки с поисковым поведением, обнюхиванием предметов, высокой постановкой ушей и отсутствием потребности в постоянном зрительном контакте. Поскольку постановка ушей положительно коррелировала с присутствием людей и не сопровождалась признаками тревожности, данный признак является маркером направленного внимания собак.

Таблица 2. Классификация поведенческих паттернов собак по результатам видеонаблюдения

Table 2. Classification of behavioral dog's patterns based on video surveillance results

Категория поведения	Поведенческие маркеры	Примеры видеозаписей (ситуации)	Цель анализа	Источники
Возбужденное поведение	Частое дыхание, вздрагивания, ориентировочные реакции на звук, активные движения, привлечение внимания (лай, прыжки)	Собаки в новом окружении, появление незнакомого человека, резкие звуки	Оценка уровня тревожности и импульсивности, выявление гиперактивности и излишней возбудимости	[4, 47, 49]
Боязливое поведение	Дрожь, скуление, поджатый хвост, арочная осанка, попытка спрятаться или убежать, замирание	Прием у ветеринара, резкие звуки (громкие хлопки, фейерверки), присутствие новых людей	Определение реакции на стрессовые стимулы, выявление страхов и фобий у собак	[46, 48]
Расслабленное поведение	Спокойное бодрствование, виляние хвостом, отсутствие напряженности в движениях, спокойное дыхание	Пребывание в привычной обстановке (дома, на прогулке), взаимодействие с владельцем	Анализ нормального состояния собаки, оценка общего уровня благополучия и адаптации в среде	[5, 59]
Иное поведение	Зевота, лай, рычание, облизывание губ, попытки разгрызть предметы, перемещения с целью поиска	Одинокое пребывание собаки дома, скука, ожидание хозяина	Выявление признаков дезадаптации, стресса или скуки, анализ поведения при длительном одиночестве	[23, 67]
Симптомы СДВГ (гиперактивное поведение)	Прыжки, бег без цели, избыточная вокализация (лай, вой), чрезмерный груминг (вылизывание, почесывание), удары об стены или предметы	Собака в помещении без возможности выхода, ограниченное пространство для движений	Оценка признаков гиперактивности и синдрома дефицита внимания, анализ двигательной активности и ее корреляции с эмоциональным состоянием	[4, 5]

² Hall C.S., Ballachey E.L. A study of the rat's behavior in a field: a contribution to method in comparative psychology. University of California Publications in Psychology. 1932; 6: 1–12.

Недостатками опросных методов и поведенческих тестов у собак являются недостаточная валидность, повторяемость и объективность данных методик, а также большое влияние обстановки тестирования и перспектив обнародования результатов [36]. Поведенческие тесты могут показывать достоверные результаты при регистрации и анализе коротких фрагментов активности в строго определенных, стандартизированных ситуациях [53]. В то же время данные тесты позволяют получить объективные результаты поведения в естественной среде ввиду отсутствия экзогенных помех [43].

Необходимо отметить, что в сравнении с анализом биохимических и физиологических параметров, требующих тщательной подготовки и анализа, поведенческие параметры являются неинвазивными. Однако данные типы анализа поведенческих параметров и опросных тестов имеют ограничения по времени, зависят от компетенций исследователя и точности разработки тестовой процедуры [54].

Возможности использования метода акселерометрии при анализе поведения собак

Ряд исследований посвящены анализу эффективности применения акселерометров для контроля уровня активности собак — здоровых и при возникновении различных заболеваний [55]. Акселерометры потенциально могут применяться для раннего обнаружения изменений активности или характеристик движений у собак, связанных с ухудшением здоровья [56]. С позиции благополучия животных метод акселерометрии перспективен, поскольку модели активности собак-компаньонов и рабочих собак, а также в некоторой степени свободно гуляющих собак привязаны к активности человека [57]. Автоматическое различение поведения принесет пользу поведенческим исследованиям, где поведение традиционно измеряется путем ручной аннотации видеозаписей. Это создает возможность обнаружения поведения, связанного с психологическим или физическим дискомфортом [5].

Акселерометры представляют собой небольшие носимые устройства, закрепляемые на теле собаки — на ошейнике или корпусе [33]. Использование данных устройств позволяет объективно оценить уровень активности собак [55]. Чаще всего используется формат ошейника, на котором закрепляемые датчики регистрируют движения, количество шагов, положения тела и угол наклона головы животных [3]. Именно формат ошейника или шлейки с закрепленным техническим устройством рассматривается как наиболее оптимальный в сравнении с другими носимыми устройствами [5, 33, 55, 58]. При креплении акселерометра и гироскопа на шлейке точность идентификации типа движений составила 91% и 75% — при расположении на ошейнике [5]. При этом мелкие движения (принюхивание) легче

поддавались идентификации в сравнении со спокойным сидением, лежанием и стоянием.

Существует метод классификации поведения собак на основании анализа данных двигательной активности, полученной с использованием акселерометров (на ошейнике) и проанализированных с использованием технологий искусственного интеллекта [3, 59]. Точность распознавания паттерна поведения составляет 94% и выше, а время работы системы — 1 с. Целевым аспектом является не проблемное поведение, а состояние здоровья собак.

Описывается возможность применения метода акселерометрии для оценки цикла «сон — бодрствование» у домашних собак. Важность учета цикла «сон — бодрствование» при оценке уровня благополучия связана с выявленной корреляцией тревожности собак и качества сна. На основании полученных данных была предложена модель сна и бодрствования на основе уровня активности [60].

В разработке [61] показана возможность использования носимых датчиков для поведенческого, экологического и физиологического мониторинга служебных собак в условиях открытых пространств на основании контроля температуры кожи, ЧСС и двигательной активности, объединенных на основе носимой шлейки. Показана возможность неинвазивного контроля состояния собак в процессе поиска и обнаружения целевых объектов (в данном случае обонятельных), что увеличивает перспективность включения собак в человеко-машинные интерфейсы.

Недостатком метода акселерометрии является необходимость жесткой фиксации прибора, так как вносимые аппаратные помехи могут существенно исказить полученные результаты [33, 58, 62]. Использование данных приборов не позволяет классифицировать типы поведения собак в режиме реального времени, поскольку сами акселерометры не имеют подобной функции. Для интерпретации полученных данных необходимы использование специализированного программного обеспечения и математическая обработка данных [5]. Кроме того, в литературе отсутствуют исследования о корреляции показателей акселерометрии и эмоционального состояния животных.

Видеофиксация

Видеофиксация поведения собак является одним из наиболее надежных и современных методов определения нормального и девиантного поведения. Теоретической основой применения видеозаписей является предположение о наличии определенных поведенческих паттернов у собак, имеющих те или иные варианты поведенческих отклонений. Данные паттерны будут отсутствовать у собак без нарушений поведения. Отслеживание и описание двигательной активности и поз собак необходимы для формирования этограммы и уточнения понимания поведения

животных, что создает возможность более объективной оценки [3, 63].

Именно двигательные паттерны являются ключевыми маркерами при оценке поведенческих особенностей собак. Для оценки двигательной активности, связанной в том числе с нарушением состояния здоровья собак, применяются методы актиграфии, акселерометрии [64], видеорегистрации поведения [6, 23]. Комплексная оценка движений и вокализаций позволяет получить объективные результаты поведения в естественной среде [43]. Видеозаписи позволяют более объективно проанализировать поведение животных в сравнении с ручным наблюдением, опросниками и аудиозаписями [47].

Поведение собаки при оценке видеозаписей может быть разделено на статическое (спокойное сидение, стояние, лежание) и активное (любые виды двигательной активности) [2]. Применение анализа видеозаписей является широко распространенным методом оценки поведения, уровня тревожности, стиля реагирования (к примеру, в ветеринарных клиниках на приеме, при тестировании собак для оценки уровня импульсивности).

Модели семейства YOLO являются ключевыми нейросетевыми моделями, применяемыми в большинстве современных исследований. Данные программные средства базируются на использовании унифицированной структуры, которая предсказывает границы объектов и вероятности их принадлежности к определенному классу по исходным изображениям. Такой подход к обнаружению объектов в один этап позволяет обрабатывать видеокadres в режиме реального времени без необходимости дополнительных этапов постобработки.

В исследованиях [4, 65] с применением нейронных сетей были проанализированы данные для оценки поведения собак и классификации окраски эмоциональных состояний на основании движения хвоста. Похожие данные были получены в исследовании [66], где с применением

технологии машинного зрения на основании 3D-трекинга проведен детализированный анализ поведения собак в присутствии и отсутствии незнакомца. Ключевыми показателями стали положение и направление движения кончика хвоста относительно других частей тела.

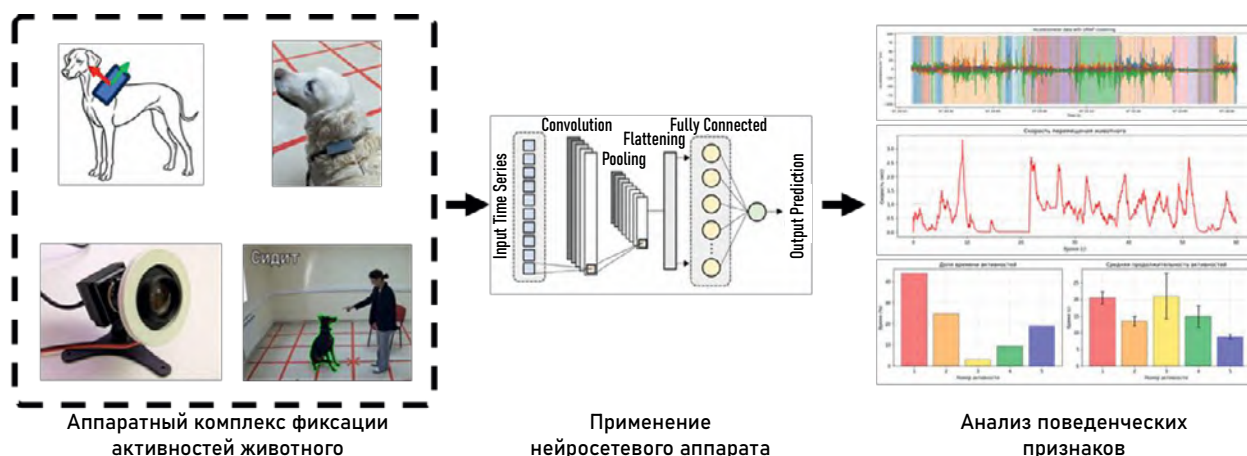
В сходном исследовании [67] в основу классификации было положено отдельное определение положения тела, движений головы и корпуса собаки, а также крупных движений конечностей. Сочетание методов искусственного интеллекта для анализа поведения собак, определяемое авторами статьи как оптимальное на основе данных литературы, приведено на рисунке 1.

В работах [6, 23] описывается метод автоматического слежения и видеофиксации произвольных движений собаки с нарушениями поведения на основании алгоритмов машинного обучения, ответственной за предсказание объектов, расположенных в ее границах. В качестве валидных маркеров для оценки нормального и отклоняющегося поведения собаки применяются скорость движения, охват пространства (в данном исследовании — экспериментальной комнаты), количество и угол поворота корпуса собаки и частота смены направления при движении. На основе анализа видеозаписей СДВГ-подобного поведения собак определены 12 параметров двигательной активности, внедренные в дальнейшем в практику ветеринарного консультирования.

В другом исследовании [4] в качестве маркеров неблагополучного поведения на видеозаписях фиксировали прыжки, удары об стену корпусом, избыточный груминг (почесывание, выкусывание, вылизывание шерсти) и избыточную вокализацию (лай, вой, скуление). Использование видеозаписей при анализе мелких поведенческих признаков, связанных с наличием страха перед громкими звуками, позволило выделить в качестве валидных маркеров длительность бега, одышку, вокализацию, частое моргание и попытки спрятаться [47].

Рис. 1. Схема применения методов искусственного интеллекта для анализа поведения собак

Fig. 1. Scheme of application of artificial intelligence methods for analyzing dog behavior



В комплексном исследовании [68] на основании данных анализа видеозаписей поведения, фМРТ и поведенческих тестов выявлена корреляция активации областей мозга, связанных с эмоциональными реакциями (хвостатое ядро и структуры лимбической системы), обработкой зрительных стимулов и моторных программ, поведенческой активностью при взаимодействии собаки со знакомыми и незнакомыми людьми.

В результате проведенного анализа исследований были выделены поведенческие паттерны, на основании которых авторами выдвигается предположение о факте депривации видотипичного поведения собак. К таковым относится снижение скорости движения и частоты переключения между видами активности [4, 65–68].

Существует прототип системы объективного анализа видеозаписей поведения собак с использованием искусственного интеллекта для мониторинга здоровья и благополучия [2]. Точность работы системы составляет 95% при распознавании типа поведения в режиме реального времени. Целевым аспектом является не проблемное поведение, а состояние здоровья собак.

Последовательный сбор и анализ поведенческих данных, полученных с применением автоматизированных систем, а также их анализ в реальном и отсроченном режиме создадут возможность раннего выявления признаков неблагополучия при минимальном вмешательстве. В условиях больших данных именно системы машинного обучения могут создать возможность объективного выявления, оценки и прогнозирования снижения уровня благополучия животных-компаньонов [3].

Технологии искусственного интеллекта существенно повышают валидность получаемых научных данных. Обученная нейронная сеть может и должна использоваться в научных разработках и практике для быстрого выявления поведенческих признаков дезадаптации при минимальном дообучении.

Сочетание точной оценки позы и отслеживания траектории позволит получить ценные сведения о поведении собаки и оценить различные параметры, связанные с ее движением. Кроме того, это позволит решить актуальнейшую научную проблему разграничения состояний ситуативной тревожности, связанной с новой обстановкой, реакцией на незнакомого человека и по сути являющейся положительной приспособительной реакцией, и длительно сохраняющейся избыточной тревожности, имеющей причинно-следственные связи с дезадаптацией и в итоге определяющей комплекс поведенческих нарушений.

С учетом имеющегося у владельцев запроса на объективную оценку активности животных и причин возникновения проблемного поведения это определяет дальнейшие перспективы использования систем искусственного интеллекта для обеспечения необходимого качества жизни домашних животных. Решающим шагом в понимании

поведения животных, которое включает в себя модели активности и эмоциональные модели, является создание определенных этограмм, связанных с этим видом, путем мониторинга поз тела и физических движений [4, 69].

Выводы/Conclusions

Проведенный анализ отечественных и зарубежных публикаций показал большую научную значимость внедрения систем искусственного интеллекта при разработке комплексного метода объективной оценки поведения собак. Данный вопрос является одним из фронтиров точного животноводства для раннего выявления признаков неблагополучия у животных. Совместный анализ визуальных наблюдений человеком, показателей акселерометра и видеозаписей рассматривается как «золотой стандарт» при определении типа поведения собак.

Вместе с тем анализ российских публикаций, посвященных методам исследования поведения собак, позволит утверждать доминирование концепции, связанной с анализом условно-рефлекторной деятельности и слабого учета когнитивных функций животных. Данный подход является общеприменимым и оправданным при подготовке рабочих и спортивных собак. В то же время исследования, целевой группой в которых являются собаки-компаньоны, в российской научной литературе не представлены.

Авторами не обнаружены работы, в которых проводилось использование систем искусственного интеллекта для выявления поведенческих паттернов, а также поиска их корреляции с взаимоотношениями в диаде «владелец — питомец».

Проанализированные зарубежные исследования сконцентрированы на принципиальной возможности применения методов машинного обучения для оценки поведения собаки. Ни в одном из них не проводилось сопоставление полученных результатов с анамнезом жизни, поведенческими признаками благополучия, стилия взаимодействия с владельцем и предметами как показателя психоэмоционального состояния животного.

В связи с этим авторы данной статьи предлагают более широкое внедрение опросников для владельцев, учет мелких поведенческих признаков при визуальном анализе состояния. Актуальным остается вопрос расширения применения современных технических средств и систем компьютерного зрения (на основе анализа больших данных) при диагностике поведенческих нарушений у собак.

Интеграция методов зоопсихологии, этологии, ветеринарной медицины и алгоритмов машинного обучения позволит обеспечить принципиально иной уровень определения разных типов поведения, что в итоге будет способствовать улучшению уровня благополучия животных-компаньонов. В результате данный подход может стать частью методов рутинного

выявления признаков агрессивного или тревожного поведения животного.

В зависимости от поставленной задачи отдельные аспекты метода могут использоваться при работе ветеринарных врачей на приеме, при подготовке служебных собак, собак-спортсменов и собак-поводырей, в работе кинологов и зоопсихологов — как с проблемными собаками, так и

при прохождении нормальной социализации. Это даст возможность экспертам, владельцам все-сторонне оценить поведение и физическое состояние собаки. Раннее выявление потенциальных проблем со здоровьем и поведением будет способствовать углублению понимания поведения собак-компаньонов и улучшению благополучия в диаде «человек — собака».

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-01561.
<https://rscf.ru/project/24-28-01561/>

FUNDING

This research was funded by Russian Science Foundation № 24-28-01561.
<https://rscf.ru/project/24-28-01561/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kasnesis P. *et al.* Deep Learning Empowered Wearable-Based Behavior Recognition for Search and Rescue Dogs. *Sensors*. 2022; 22(3): 993.
<https://doi.org/10.3390/s22030993>
2. Atif O., Lee J., Park D., Chung Y. Behavior-Based Video Summarization System for Dog Health and Welfare Monitoring. *Sensors*. 2023; 23(6): 2892.
<https://doi.org/10.3390/s23062892>
3. Aguilar-Lazcano C.A., Espinosa-Curiel I.E., Ríos-Martínez J.A., Madera-Ramírez F.A., Pérez-Espinosa H. Machine Learning-Based Sensor Data Fusion for Animal Monitoring: Scoping Review. *Sensors*. 2023; 23(12): 5732.
<https://doi.org/10.3390/s23125732>
4. Aich S., Chakraborty S., Sim J.-S., Jang D.-J., Kim H.-C. The Design of an Automated System for the Analysis of the Activity and Emotional Patterns of Dogs with Wearable Sensors Using Machine Learning. *Applied Sciences*. 2019; 9(22): 4938.
<https://doi.org/10.3390/app9224938>
5. Vehkaoja A. *et al.* Description of movement sensor dataset for dog behavior classification. *Data in Brief*. 2022; 40: 107822.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107822>
6. Fux A. *et al.* Objective Video-Based Assessment of ADHD-Like Canine Behavior Using Machine Learning. *Animals*. 2021; 11(10): 2806.
<https://doi.org/10.3390/ani11102806>
7. Mariti C., Raspanti E., Zilocchi M., Carlone B. Gazzano A. The assessment of dog welfare in the waiting room of a veterinary clinic. *Animal Welfare*. 2015; 24(3): 299–305.
<https://doi.org/10.7120/09627286.24.3.299>
8. Helsly M., Priymenko N., Girault C., Duranton C., Gaunet F. Dog behaviours in veterinary consultations: Part II. The relationship between the behaviours of dogs and their owners. *The Veterinary Journal*. 2022; 281: 105789.
<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2022.105789>
9. Kim Y., Sa J., Chung Y., Park D., Lee S. Resource-Efficient Pet Dog Sound Events Classification Using LSTM-FCN Based on Time-Series Data. *Sensors*. 2018; 18(11): 4019.
<https://doi.org/10.3390/s18114019>
10. Пеньков Д.Я., Новопашина С.И., Санников М.Ю. Определение поисковых способностей собак служебных пород в разные возрастные периоды. *Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства*. 2010; 3(1): 47–49.
<https://elibrary.ru/nwvud>
11. Ивонина О.Ю., Маркелова И.Н. Тестирование собак породы американский стаффордширский терьер по поведению для допуска к племенному разведению. *Вестник ИРГСАХ*. 2016; 76: 129–137.
<https://elibrary.ru/wzzjcl>
12. Семенихина О.Н., Матвеев Е.С. Коррекция поведения собак. *Иппология и ветеринария*. 2013; (4): 101–104.
<https://elibrary.ru/ruxglr>
13. Ефимова Н.А. Выявление типа темперамента собаки и его влияние на ее обучаемость и дрессируемость. *Наука и социум. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Новосибирск: Сибирский институт практической психологии, педагогики и социальной работы. 2017; 53–55.
<https://elibrary.ru/ygnmdl>

REFERENCES

1. Kasnesis P. *et al.* Deep Learning Empowered Wearable-Based Behavior Recognition for Search and Rescue Dogs. *Sensors*. 2022; 22(3): 993.
<https://doi.org/10.3390/s22030993>
2. Atif O., Lee J., Park D., Chung Y. Behavior-Based Video Summarization System for Dog Health and Welfare Monitoring. *Sensors*. 2023; 23(6): 2892.
<https://doi.org/10.3390/s23062892>
3. Aguilar-Lazcano C.A., Espinosa-Curiel I.E., Ríos-Martínez J.A., Madera-Ramírez F.A., Pérez-Espinosa H. Machine Learning-Based Sensor Data Fusion for Animal Monitoring: Scoping Review. *Sensors*. 2023; 23(12): 5732.
<https://doi.org/10.3390/s23125732>
4. Aich S., Chakraborty S., Sim J.-S., Jang D.-J., Kim H.-C. The Design of an Automated System for the Analysis of the Activity and Emotional Patterns of Dogs with Wearable Sensors Using Machine Learning. *Applied Sciences*. 2019; 9(22): 4938.
<https://doi.org/10.3390/app9224938>
5. Vehkaoja A. *et al.* Description of movement sensor dataset for dog behavior classification. *Data in Brief*. 2022; 40: 107822.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107822>
6. Fux A. *et al.* Objective Video-Based Assessment of ADHD-Like Canine Behavior Using Machine Learning. *Animals*. 2021; 11(10): 2806.
<https://doi.org/10.3390/ani11102806>
7. Mariti C., Raspanti E., Zilocchi M., Carlone B. Gazzano A. The assessment of dog welfare in the waiting room of a veterinary clinic. *Animal Welfare*. 2015; 24(3): 299–305.
<https://doi.org/10.7120/09627286.24.3.299>
8. Helsly M., Priymenko N., Girault C., Duranton C., Gaunet F. Dog behaviours in veterinary consultations: Part II. The relationship between the behaviours of dogs and their owners. *The Veterinary Journal*. 2022; 281: 105789.
<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2022.105789>
9. Kim Y., Sa J., Chung Y., Park D., Lee S. Resource-Efficient Pet Dog Sound Events Classification Using LSTM-FCN Based on Time-Series Data. *Sensors*. 2018; 18(11): 4019.
<https://doi.org/10.3390/s18114019>
10. Penkov D.Ya., Novopashina S.I., Sannikov M.Yu. Determination of the search abilities of dogs of service breeds in different age periods. *Sbornik nauchnykh trudov Stavropol'skogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zhivotnovodstva i kormoproizvodstva*. 2010; 3(1): 47–49 (in Russian).
<https://elibrary.ru/nwvud>
11. Ivonina O.Yu., Markelova I.N. Test Dog breed American staffordshire terrier for conduct for admission to breeding. *Vestnik IrgSCHA*. 2016; 76: 129–137 (in Russian).
<https://elibrary.ru/wzzjcl>
12. Semenikhina O.N., Matveenko Y. Correction of the behavior of dogs. *Hippology and Veterinary Medicine*. 2013; (4): 101–104 (in Russian).
<https://elibrary.ru/ruxglr>
13. Efimova N.A. Identify the dog's temperament and its impact on her learning and dressiest. *Science and Society. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Novosibirsk: Siberian Institute of Practical Psychology, Pedagogy and Social Work. 2017; 53–55 (in Russian).
<https://elibrary.ru/ygnmdl>

14. Алтухов Б.Н., Мистюкова О.Н., Фоминок А.А. Особенности агрессивного поведения собак. *Ветеринарно-санитарные аспекты качества и безопасности сельскохозяйственной продукции. Материалы V Международной научно-практической конференции*. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I. 2021; 1: 18–25. <https://elibrary.ru/suawwa>
15. Савичева С.В. Коррекция поведения собак. *Иппология и ветеринария*. 2013; (2): 49–52. <https://elibrary.ru/rbpdzd>
16. Борова П.И., Сунцова Е.Н. Зоопсихология — социальное поведение собак. *Научные труды студентов Ижевской ГСХА*. 2019; (1): 205–209. <https://elibrary.ru/bgauwj>
17. Бутова А.А. Асоциальные собаки: социализация и снижение влияния стресс-факторов при ветеринарных манипуляциях. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2021; 247: 27–33. <https://elibrary.ru/rfaknf>
18. Гончарова Д.А., Слесаренко Н.А. Корреляционная зависимость поведенческих отклонений с типом латерализации у *Canis lupus familiaris*. *Неделя студенческой науки. Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции*. М.: Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К.И. Скрябина. 2022; 371–373. <https://elibrary.ru/zynzqc>
19. Lit L., Schweitzer J.B., Iosif A.-M., Oberbauer A.M. Owner reports of attention, activity, and impulsivity in dogs: a replication study. *Behavioral and Brain Functions*. 2010; 6: 1. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-6-1>
20. Wright H.F., Mills D.S., Pollux P.M. Behavioural and physiological correlates of impulsivity in the domestic dog (*Canis familiaris*). *Physiology & Behavior*. 2012; 105(3): 676–682. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.09.019>
21. Puurunen J. *et al.* A non-targeted metabolite profiling pilot study suggests that tryptophan and lipid metabolisms are linked with ADHD-like behaviours in dogs. *Behavioral and Brain Functions*. 2016; 12: 27. <https://doi.org/10.1186/s12993-016-0112-1>
22. Masson S., Gaultier E. Retrospective study on hypersensitivity-hyperactivity syndrome in dogs: long-term outcome of high dose fluoxetine treatment and proposal of a clinical score. *Dog Behavior*. 2018; 4(2): 15–32. <https://doi.org/10.4454/db.v4i2.79>
23. Bleuer-Elsner S. *et al.* Computational Analysis of Movement Patterns of Dogs with ADHD-Like Behavior. *Animals*. 2019; 9(12): 1140. <https://doi.org/10.3390/ani9121140>
24. Bunford N., Csibra B., Peták C., Ferdinandy B., Miklósi Á., Gácsi M. Associations among behavioral inhibition and owner-rated attention, hyperactivity/impulsivity, and personality in the domestic dog (*Canis familiaris*). *Journal of Comparative Psychology*. 2019; 133(2): 233–243. <https://doi.org/10.1037/com0000151>
25. Dinwoodie I.R., Dwyer B., Zottol V., Gleason D., Dodman N.H. Demographics and comorbidity of behavior problems in dogs. *Journal of Veterinary Behavior*. 2019; 32: 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2019.04.007>
26. Salonen M., Mikkola S., Hakanen E., Sulkama S., Puurunen J., Lohi H. Personality traits associate with behavioral problems in pet dogs. *Translational Psychiatry*. 2022; 12: 78. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-01841-0>
27. Salonen M., Mikkola S., Hakanen E., Sulkama S., Puurunen J., Lohi H. Reliability and Validity of a Dog Personality and Unwanted Behavior Survey. *Animals*. 2021; 11(5): 1234. <https://doi.org/10.3390/ani11051234>
28. Salonen M. *et al.* Prevalence, comorbidity, and breed differences in canine anxiety in 13,700 Finnish pet dogs. *Scientific Reports*. 2020; 10: 2962. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59837-z>
29. Mikkola S. *et al.* Aggressive behaviour is affected by demographic, environmental and behavioural factors in purebred dogs. *Scientific Reports*. 2021; 11: 9433. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88793-5>
30. Powell L., Duffy D.L., Kruger K.A., Watson B., Serpell J.A. Relinquishing Owners Underestimate Their Dog's Behavioral Problems: Deception or Lack of Knowledge?. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 734973. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.734973>
31. Gáll Z., Székely O. Role of Vitamin D in Cognitive Dysfunction: New Molecular Concepts and Discrepancies between Animal and Human Findings. *Nutrients*. 2021; 13(11): 3672. <https://doi.org/10.3390/nu13113672>
14. Altukhov B.N., Mistyukova O.N., Fominok A.A. Features of aggressive behavior of dogs. *Veterinary and sanitary aspects of the quality and safety of agricultural products. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I. 2021; 1: 18–25 (in Russian). <https://elibrary.ru/suawwa>
15. Savicheva S.V. Corrector of dog behavior. *Hippology and Veterinary Medicine*. 2013; (2): 49–52 (in Russian). <https://elibrary.ru/rbpdzd>
16. Borina P.I., Suntsova E.N. Zoopsychology is the social behavior of dogs. *Nauchnyye trudy studentov Izhevskoy GSKhA*. 2019; (1): 205–209 (in Russian). <https://elibrary.ru/bgauwj>
17. Butova A.A. Antisocial dogs: socialization and reduction of the influence of stress factors during veterinary manipulations. *Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2021; 247: 27–33 (in Russian). <https://elibrary.ru/rfaknf>
18. Goncharova D.A., Slesarenko N.A. The correlation of behavioral deviations with the type of lateralization in *Canis lupus familiaris*. *Student Science Week. Proceedings of the All-Russian Student Scientific and Practical Conference*. Moscow: Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — Moscow Veterinary Academy named after K. I. Scriabin. 2022; 371–373 (in Russian). <https://elibrary.ru/zynzqc>
19. Lit L., Schweitzer J.B., Iosif A.-M., Oberbauer A.M. Owner reports of attention, activity, and impulsivity in dogs: a replication study. *Behavioral and Brain Functions*. 2010; 6: 1. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-6-1>
20. Wright H.F., Mills D.S., Pollux P.M. Behavioural and physiological correlates of impulsivity in the domestic dog (*Canis familiaris*). *Physiology & Behavior*. 2012; 105(3): 676–682. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.09.019>
21. Puurunen J. *et al.* A non-targeted metabolite profiling pilot study suggests that tryptophan and lipid metabolisms are linked with ADHD-like behaviours in dogs. *Behavioral and Brain Functions*. 2016; 12: 27. <https://doi.org/10.1186/s12993-016-0112-1>
22. Masson S., Gaultier E. Retrospective study on hypersensitivity-hyperactivity syndrome in dogs: long-term outcome of high dose fluoxetine treatment and proposal of a clinical score. *Dog Behavior*. 2018; 4(2): 15–32. <https://doi.org/10.4454/db.v4i2.79>
23. Bleuer-Elsner S. *et al.* Computational Analysis of Movement Patterns of Dogs with ADHD-Like Behavior. *Animals*. 2019; 9(12): 1140. <https://doi.org/10.3390/ani9121140>
24. Bunford N., Csibra B., Peták C., Ferdinandy B., Miklósi Á., Gácsi M. Associations among behavioral inhibition and owner-rated attention, hyperactivity/impulsivity, and personality in the domestic dog (*Canis familiaris*). *Journal of Comparative Psychology*. 2019; 133(2): 233–243. <https://doi.org/10.1037/com0000151>
25. Dinwoodie I.R., Dwyer B., Zottol V., Gleason D., Dodman N.H. Demographics and comorbidity of behavior problems in dogs. *Journal of Veterinary Behavior*. 2019; 32: 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2019.04.007>
26. Salonen M., Mikkola S., Hakanen E., Sulkama S., Puurunen J., Lohi H. Personality traits associate with behavioral problems in pet dogs. *Translational Psychiatry*. 2022; 12: 78. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-01841-0>
27. Salonen M., Mikkola S., Hakanen E., Sulkama S., Puurunen J., Lohi H. Reliability and Validity of a Dog Personality and Unwanted Behavior Survey. *Animals*. 2021; 11(5): 1234. <https://doi.org/10.3390/ani11051234>
28. Salonen M. *et al.* Prevalence, comorbidity, and breed differences in canine anxiety in 13,700 Finnish pet dogs. *Scientific Reports*. 2020; 10: 2962. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59837-z>
29. Mikkola S. *et al.* Aggressive behaviour is affected by demographic, environmental and behavioural factors in purebred dogs. *Scientific Reports*. 2021; 11: 9433. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88793-5>
30. Powell L., Duffy D.L., Kruger K.A., Watson B., Serpell J.A. Relinquishing Owners Underestimate Their Dog's Behavioral Problems: Deception or Lack of Knowledge?. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 8: 734973. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.734973>
31. Gáll Z., Székely O. Role of Vitamin D in Cognitive Dysfunction: New Molecular Concepts and Discrepancies between Animal and Human Findings. *Nutrients*. 2021; 13(11): 3672. <https://doi.org/10.3390/nu13113672>

32. Авиллов А.В., Фомина А.С., Крикунова А.А., Ермаков А.М. Методика классификации вокализаций собак как маркера тревожного или агрессивного поведения. *Ветеринария Кубани*. 2022; (3): 35–37. <https://elibrary.ru/cwjbsn>
33. Авиллов А.В., Фомина А.С., Скубак П.Г., Крахмалев Т.К., Ермаков А.М. Разработка устройства для оценки эмоционального состояния собак-компаньонов на основе анализа вокализаций при тревожности и лае. *Ветеринарная патология*. 2023; 22(3): 32–44. <https://doi.org/10.23947/2949-4826-2023-22-3-32-44>
34. Rodriguez K.E., Herzog H., Gee N.R. Variability in Human-Animal Interaction Research. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 7: 619600 <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.619600>
35. Фомина А.С., Васильев П.В., Долгов В.В., Крикунова А.А., Ермаков А.М. Новый подход к комплексной оценке проблемного поведения собак-компаньонов. *Сообщение 1. Международный вестник ветеринарии*. 2025; (1): 424–436. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2025.1.424>
36. Фомина А.С. и др. Проблемное поведение собак-компаньонов: важно для человека, важно для общества. *Российский психологический журнал*. 2024; 21(4): 45–78. <https://doi.org/10.21702/3k5pk670>
37. Tiira K., Lohi H. Reliability and validity of a questionnaire survey in canine anxiety research. *Applied Animal Behaviour Science*. 2014; 155: 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2014.03.007>
38. Tiira K., Sulkama S., Lohi H. Prevalence, comorbidity, and behavioral variation in canine anxiety. *Journal of Veterinary Behavior*. 2016; 16: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2016.06.008>
39. Westgarth C., Brooke M., Christley R.M. How many people have been bitten by dogs? A cross-sectional survey of prevalence, incidence and factors associated with dog bites in a UK community. *Journal of Epidemiology & Community Health*. 2018; 72(4): 331–336. <https://doi.org/10.1136/jech-2017-209330>
40. Bowen J., García E., Darder P., Argüelles J., Fatjó J. The effects of the Spanish COVID-19 lockdown on people, their pets, and the human-animal bond. *Journal of Veterinary Behavior*. 2020; 40: 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2020.05.013>
41. Katica M. et al. Interdisciplinary aspects of possible negative effects of dogs on humans in Bosnia and Herzegovina. *Medicinski glasnik*. 2020; 17(2): 246–251. <https://doi.org/10.17392/1187-20>
42. Degeling C., Hall J., van Eeden L.M., Finlay S.M., Gurung S.M., Brookes V.J. Representations of Free-Living and Unrestrained Dogs as an Emerging Public Health Issue in Australian Newspapers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(11): 5807. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115807>
43. Gobbo E., Zupan M. Dogs' Sociability, Owners' Neuroticism and Attachment Style to Pets as Predictors of Dog Aggression. *Animals*. 2020; 10(2): 315. <https://doi.org/10.3390/ani10020315>
44. Parente G. et al. Consequences of COVID-19 Lockdown on Children and Their Pets: Dangerous Increase of Dog Bites among the Paediatric Population. *Children*. 2021; 8(8): 620. <https://doi.org/10.3390/children8080620>
45. Stubbsjoen S.M., Moe R.O., Johannessen C., Larsen M., Madsen H., Muri K. Can shelter dog observers score behavioural expressions consistently over time?. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2022; 64: 35. <https://doi.org/10.1186/s13028-022-00654-x>
46. Franzini de Souza C.C., Dias D.P.M., de Souza R.N., de Medeiros M.A. Use of behavioural and physiological responses for scoring sound sensitivity in dogs. *PLoS ONE*. 2018; 13(8): e0200618. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200618>
47. Gähwiler S., Bremhorst A., Tóth K., Riemer S. Fear expressions of dogs during New Year fireworks: a video analysis. *Scientific Reports*. 2020; 10: 16035. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72841-7>
48. Scaglia E., Cannas S., Minero M., Frank D., Bassi A., Palestini C. Video analysis of adult dogs when left home alone. *Journal of Veterinary Behavior*. 2013; 8(6): 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2013.04.065>
49. Gruen M.E. et al. The use of an open-field model to assess sound-induced fear and anxiety-associated behaviors in Labrador retrievers. *Journal of Veterinary Behavior*. 2015; 10(4): 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2015.03.007>
50. Fish R.E., Foster M.L., Gruen M.E., Sherman B.L., Dorman D.C. Effect of Wearing a Telemetry Jacket on Behavioral and Physiologic Parameters of Dogs in the Open-Field Test. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*. 2017; 56(4): 382–389.
32. Avilov A.V., Fomina A.S., Krikunova A.A., Ermakov A.M. Method for classifying dog vocalizations as a marker of anxious or aggressive behavior. *Veterinaria Kubani*. 2022; (3): 35–37 (in Russian). <https://elibrary.ru/cwjbsn>
33. Avilov A.V., Fomina A.S., Skubak P.G., Krakhmalev T.K., Ermakov A.M. Development of a Device for Assessing the Emotional State of Companion Dogs Based on the Analysis of Vocalizations Associated with Anxiety and Barking. *Russian Journal of Veterinary Pathology*. 2023; 22(3): 32–44 (in Russian). <https://doi.org/10.23947/2949-4826-2023-22-3-32-44>
34. Rodriguez K.E., Herzog H., Gee N.R. Variability in Human-Animal Interaction Research. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021; 7: 619600 <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.619600>
35. Fomina A.S., Vasiliev P.V., Dolgov V.V., Krikunova A.A., Ermakov A.M. A new approach to the comprehensive assessment of problematic behavior of companion dogs. Message 1. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2025; (1): 424–436 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2025.1.424>
36. Fomina A.S. et al. Problematic behavior of companion dogs: significant for humans, significant for society. *Russian Psychological Journal*. 2024; 21(4): 45–78. <https://doi.org/10.21702/3k5pk670>
37. Tiira K., Lohi H. Reliability and validity of a questionnaire survey in canine anxiety research. *Applied Animal Behaviour Science*. 2014; 155: 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2014.03.007>
38. Tiira K., Sulkama S., Lohi H. Prevalence, comorbidity, and behavioral variation in canine anxiety. *Journal of Veterinary Behavior*. 2016; 16: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2016.06.008>
39. Westgarth C., Brooke M., Christley R.M. How many people have been bitten by dogs? A cross-sectional survey of prevalence, incidence and factors associated with dog bites in a UK community. *Journal of Epidemiology & Community Health*. 2018; 72(4): 331–336. <https://doi.org/10.1136/jech-2017-209330>
40. Bowen J., García E., Darder P., Argüelles J., Fatjó J. The effects of the Spanish COVID-19 lockdown on people, their pets, and the human-animal bond. *Journal of Veterinary Behavior*. 2020; 40: 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2020.05.013>
41. Katica M. et al. Interdisciplinary aspects of possible negative effects of dogs on humans in Bosnia and Herzegovina. *Medicinski glasnik*. 2020; 17(2): 246–251. <https://doi.org/10.17392/1187-20>
42. Degeling C., Hall J., van Eeden L.M., Finlay S.M., Gurung S.M., Brookes V.J. Representations of Free-Living and Unrestrained Dogs as an Emerging Public Health Issue in Australian Newspapers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(11): 5807. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115807>
43. Gobbo E., Zupan M. Dogs' Sociability, Owners' Neuroticism and Attachment Style to Pets as Predictors of Dog Aggression. *Animals*. 2020; 10(2): 315. <https://doi.org/10.3390/ani10020315>
44. Parente G. et al. Consequences of COVID-19 Lockdown on Children and Their Pets: Dangerous Increase of Dog Bites among the Paediatric Population. *Children*. 2021; 8(8): 620. <https://doi.org/10.3390/children8080620>
45. Stubbsjoen S.M., Moe R.O., Johannessen C., Larsen M., Madsen H., Muri K. Can shelter dog observers score behavioural expressions consistently over time?. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2022; 64: 35. <https://doi.org/10.1186/s13028-022-00654-x>
46. Franzini de Souza C.C., Dias D.P.M., de Souza R.N., de Medeiros M.A. Use of behavioural and physiological responses for scoring sound sensitivity in dogs. *PLoS ONE*. 2018; 13(8): e0200618. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200618>
47. Gähwiler S., Bremhorst A., Tóth K., Riemer S. Fear expressions of dogs during New Year fireworks: a video analysis. *Scientific Reports*. 2020; 10: 16035. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72841-7>
48. Scaglia E., Cannas S., Minero M., Frank D., Bassi A., Palestini C. Video analysis of adult dogs when left home alone. *Journal of Veterinary Behavior*. 2013; 8(6): 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2013.04.065>
49. Gruen M.E. et al. The use of an open-field model to assess sound-induced fear and anxiety-associated behaviors in Labrador retrievers. *Journal of Veterinary Behavior*. 2015; 10(4): 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2015.03.007>
50. Fish R.E., Foster M.L., Gruen M.E., Sherman B.L., Dorman D.C. Effect of Wearing a Telemetry Jacket on Behavioral and Physiologic Parameters of Dogs in the Open-Field Test. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*. 2017; 56(4): 382–389.

51. Dalley J.W., Roiser J.P. Dopamine, serotonin and impulsivity. *Neuroscience*. 2012; 215: 42–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.03.065>
52. Bremhorst A., Sutter N.A., Würbel H., Mills D.S., Riemer S. Differences in facial expressions during positive anticipation and frustration in dogs awaiting a reward. *Scientific Reports*. 2019; 9: 19312. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55714-6>
53. Magula L., Moxley K., Lachman A. Iron deficiency in South African children and adolescents with attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Child & Adolescent Mental Health*. 2019; 31(2): 85–92. <https://doi.org/10.2989/17280583.2019.1637345>
54. Barnard S. *et al.* Quick, Accurate, Smart: 3D Computer Vision Technology Helps Assessing Confined Animals' Behaviour. *PLoS ONE*. 2016; 11(7): e0158748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158748>
55. Rowilson de Ortiz A., Belda B., Hash J., Enomoto M., Robertson J., Lascelles B.D.X. Initial exploration of the discriminatory ability of the PetPace collar to detect differences in activity and physiological variables between healthy and osteoarthritic dogs. *Frontiers in Pain Research*. 2022; 3: 949877. <https://doi.org/10.3389/fpain.2022.949877>
56. den Uijl I., Gómez Álvarez C.B., Bartram D., Dror Y., Holland R., Cook A. External validation of a collar-mounted triaxial accelerometer for second-by-second monitoring of eight behavioural states in dogs. *PLoS ONE*. 2017; 12(11): e0188481. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188481>
57. Li M.F., Nagendran L., Schroeder L., Samson D.R. The activity patterns of nonworking and working sled dogs. *Scientific Reports*. 2022; 12: 7999. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11635-5>
58. Bruno E.A., Guthrie J.W., Ellwood S.A., Mellanby R.J., Clements D.N. Global Positioning System Derived Performance Measures Are Responsive Indicators of Physical Activity, Disease and the Success of Clinical Treatments in Domestic Dogs. *PLoS ONE*. 2015; 10(2): e0117094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117094>
59. Chambers R.D. *et al.* Deep Learning Classification of Canine Behavior Using a Single Collar-Mounted Accelerometer: Real-World Validation. *Animals*. 2021; 11(6): 1549. <https://doi.org/10.3390/ani11061549>
60. Kikusui T. *et al.* Beacon-based sleep-wake monitoring in dogs. *Journal of Veterinary Medical Science*. 2024; 86(6): 631–635. <https://doi.org/10.1292/jvms.23-0472>
61. Foster M., Wu T., Roberts D.L., Bozkurt A. Preliminary Evaluation of a System with On-Body and Aerial Sensors for Monitoring Working Dogs. *Sensors*. 2022; 22(19): 7631. <https://doi.org/10.3390/s22197631>
62. Martin K.W., Olsen A.M., Duncan C.G., Duerr F.M. The method of attachment influences accelerometer-based activity data in dogs. *BMC Veterinary Research*. 2017; 13: 48. <https://doi.org/10.1186/s12917-017-0971-1>
63. Gerencsér L., Vársárhelyi G., Nagy M., Vicsek T., Miklósi A. Identification of Behaviour in Freely Moving Dogs (*Canis familiaris*) Using Inertial Sensors. *PLoS ONE*. 2013; 8(10): e77814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077814>
64. Wernimont S.M., Thompson R.J., Mickelsen S.L., Smith S.C., Alvarenga I.C., Gross K.L. Use of Accelerometer Activity Monitors to Detect Changes in Pruritic Behaviors: Interim Clinical Data on 6 Dogs. *Sensors*. 2018; 18(1): 249. <https://doi.org/10.3390/s18010249>
65. Ren W., Wei P., Yu S., Zhang Y.Q. Left-right asymmetry and attractor-like dynamics of dog's tail wagging during dog-human interactions. *iScience*. 2022; 25(8): 104747. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104747>
66. Völter C.J., Starić D., Huber L. Using machine learning to track dogs' exploratory behaviour in the presence and absence of their caregiver. *Animal Behaviour*. 2023; 197: 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2023.01.004>
67. Wan L., Ge W.-R., Zhang S., Sun Y.-L., Wang B., Yang G. Case-Control Study of the Effects of Gut Microbiota Composition on Neurotransmitter Metabolic Pathways in Children With Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Frontiers in Neuroscience*. 2020; 14: 127. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00127>
68. Karl S. *et al.* Exploring the dog-human relationship by combining fMRI, eye-tracking and behavioural measures. *Scientific Reports*. 2020; 10: 22273. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79247-5>
69. Владимиров Ф.Е., Базаев С.О., Хакимов А.Р., Юрочка С.С. Оценка поведенческих реакций у крупного рогатого скота. *Аграрная наука*. 2024; (1): 75–80. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-75-80>
51. Dalley J.W., Roiser J.P. Dopamine, serotonin and impulsivity. *Neuroscience*. 2012; 215: 42–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.03.065>
52. Bremhorst A., Sutter N.A., Würbel H., Mills D.S., Riemer S. Differences in facial expressions during positive anticipation and frustration in dogs awaiting a reward. *Scientific Reports*. 2019; 9: 19312. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55714-6>
53. Magula L., Moxley K., Lachman A. Iron deficiency in South African children and adolescents with attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Child & Adolescent Mental Health*. 2019; 31(2): 85–92. <https://doi.org/10.2989/17280583.2019.1637345>
54. Barnard S. *et al.* Quick, Accurate, Smart: 3D Computer Vision Technology Helps Assessing Confined Animals' Behaviour. *PLoS ONE*. 2016; 11(7): e0158748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158748>
55. Rowilson de Ortiz A., Belda B., Hash J., Enomoto M., Robertson J., Lascelles B.D.X. Initial exploration of the discriminatory ability of the PetPace collar to detect differences in activity and physiological variables between healthy and osteoarthritic dogs. *Frontiers in Pain Research*. 2022; 3: 949877. <https://doi.org/10.3389/fpain.2022.949877>
56. den Uijl I., Gómez Álvarez C.B., Bartram D., Dror Y., Holland R., Cook A. External validation of a collar-mounted triaxial accelerometer for second-by-second monitoring of eight behavioural states in dogs. *PLoS ONE*. 2017; 12(11): e0188481. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188481>
57. Li M.F., Nagendran L., Schroeder L., Samson D.R. The activity patterns of nonworking and working sled dogs. *Scientific Reports*. 2022; 12: 7999. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11635-5>
58. Bruno E.A., Guthrie J.W., Ellwood S.A., Mellanby R.J., Clements D.N. Global Positioning System Derived Performance Measures Are Responsive Indicators of Physical Activity, Disease and the Success of Clinical Treatments in Domestic Dogs. *PLoS ONE*. 2015; 10(2): e0117094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117094>
59. Chambers R.D. *et al.* Deep Learning Classification of Canine Behavior Using a Single Collar-Mounted Accelerometer: Real-World Validation. *Animals*. 2021; 11(6): 1549. <https://doi.org/10.3390/ani11061549>
60. Kikusui T. *et al.* Beacon-based sleep-wake monitoring in dogs. *Journal of Veterinary Medical Science*. 2024; 86(6): 631–635. <https://doi.org/10.1292/jvms.23-0472>
61. Foster M., Wu T., Roberts D.L., Bozkurt A. Preliminary Evaluation of a System with On-Body and Aerial Sensors for Monitoring Working Dogs. *Sensors*. 2022; 22(19): 7631. <https://doi.org/10.3390/s22197631>
62. Martin K.W., Olsen A.M., Duncan C.G., Duerr F.M. The method of attachment influences accelerometer-based activity data in dogs. *BMC Veterinary Research*. 2017; 13: 48. <https://doi.org/10.1186/s12917-017-0971-1>
63. Gerencsér L., Vársárhelyi G., Nagy M., Vicsek T., Miklósi A. Identification of Behaviour in Freely Moving Dogs (*Canis familiaris*) Using Inertial Sensors. *PLoS ONE*. 2013; 8(10): e77814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077814>
64. Wernimont S.M., Thompson R.J., Mickelsen S.L., Smith S.C., Alvarenga I.C., Gross K.L. Use of Accelerometer Activity Monitors to Detect Changes in Pruritic Behaviors: Interim Clinical Data on 6 Dogs. *Sensors*. 2018; 18(1): 249. <https://doi.org/10.3390/s18010249>
65. Ren W., Wei P., Yu S., Zhang Y.Q. Left-right asymmetry and attractor-like dynamics of dog's tail wagging during dog-human interactions. *iScience*. 2022; 25(8): 104747. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104747>
66. Völter C.J., Starić D., Huber L. Using machine learning to track dogs' exploratory behaviour in the presence and absence of their caregiver. *Animal Behaviour*. 2023; 197: 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2023.01.004>
67. Wan L., Ge W.-R., Zhang S., Sun Y.-L., Wang B., Yang G. Case-Control Study of the Effects of Gut Microbiota Composition on Neurotransmitter Metabolic Pathways in Children With Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Frontiers in Neuroscience*. 2020; 14: 127. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00127>
68. Karl S. *et al.* Exploring the dog-human relationship by combining fMRI, eye-tracking and behavioural measures. *Scientific Reports*. 2020; 10: 22273. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79247-5>
69. Vladimirov F.E., Bazaev S.O., Khakimov A.R., Yurochka S.S. Evaluation of behavioral responses in cattle. *Agrarian science*. 2024; (1): 75–80. (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-378-1-75-80>

ОБ АВТОРАХ

Анна Сергеевна Фомина

кандидат биологических наук, доцент
a_bogun@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4374-9244>

Павел Владимирович Васильев

кандидат технических наук
lyftzeigen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4112-7449>

Анастасия Анатольевна Крикунова

соискатель
akrikunova@donstu.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5475-5056>

Алексей Михайлович Ермаков

доктор биологических наук, профессор
amermakov@ya.ru

Донской государственный технический университет,
пл. им. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, 344003, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Anna Sergeevna Fomina

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
a_bogun@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4374-9244>

Pavel Vladimirovich Vasiliev

Candidate of Technical Sciences
lyftzeigen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4112-7449>

Anastasia Anatolyevna Krikunova

Applicant
akrikunova@donstu.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5475-5056>

Alexey Mikhailovich Ermakov

Doctor of Biological Sciences, Professor
amermakov@ya.ru

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russia



Международная выставка
сельскохозяйственной техники,
материалов и оборудования
для животноводства и растениеводства

29–31 октября 2025

г. Екатеринбург,
МВЦ «Екатеринбург-Экспо»



Забронируйте стенд
www.agroprom-ural.ru

Организаторы



Международная
Выставочная
Компания



ЕКАТЕРИНБУРГ
ЭКСПО МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР



УДК 636.32/38.064

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-71-80

А.Х. Абдурасулов¹ ✉

М.А. Каландаров²

М.Б. Ребезов^{3,4}

В.И. Косилов⁵

¹Ошский государственный университет, Ош, Кыргызстан

²Служба ветеринарии, развития животноводства, пастбищ и кормов при Министерстве водных ресурсов, сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан

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

⁴Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

⁵Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

✉ aabdurasulov@oshsu.kg

Поступила в редакцию: 20.06.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Абдурасулов А.Х., Каландаров М.А., Ребезов М.Б., Косилов В.И.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-71-80

Abdugani H. Abdurasulov¹ ✉

Myktybek A. Kalandarov²

Maksim B. Rebezov^{3,4}

Vladimir I. Kosilov⁵

¹Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

²Veterinary, Livestock, Pasture and Forage Development Service under the Ministry of Water Resources, Agriculture and Processing Industry of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

³Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

⁴Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

⁵Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

✉ aabdurasulov@oshsu.kg

Received by the editorial office: 20.06.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Abdurasulov A.Kh., Kalandarov M.A., Rebezov M.B., Kosilov V.I.

Живая масса и особенности телосложения овец породы ала-тоо

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Овцеводство является основной отраслью животноводства Кыргызской Республики и достаточно интенсивно развивается в Российской Федерации. Значительный спрос населения на баранину ставит перед селекционерами задачи по совершенствованию местных грубошерстных овец в направлении повышения их скороспелости, крепости телосложения, мясо-сальной продуктивности, способности высоко оплачивать корм и давать максимум продукции в условиях пастбищного содержания.

Методика. Проведены исследования по определению продуктивности баранов-производителей и овцематок при выведении породы овец ала-тоо мясо-сального направления продуктивности. Исследования проводили на базе в племенных заводах «Тагай-Тилек» Сузакского района Жалал-Абадской области и «Ак-Кула» Кара-Суйского района Ошской области Кыргызской Республики. Исследовали динамику живой массы и индексы телосложения.

Результаты. Выявлены преимущества продуктивных свойств породы овец ала-тоо. Средняя живая масса баранов-производителей гиссарской породы составляла $95,5 \pm 2,14$ кг с колебанием 85,6–103,7 кг, баранов-производителей местной грубошерстной породы на $61,4 \pm 2,64$ кг, или на 33,5%, ниже. Средняя живая масса маток местных грубошерстных овец составляет $55,3 \pm 0,41$ кг с колебанием от 52,3 до 59,4 кг. При рождении у баранчиков по индексу длинноности, костистости и перерослости между группами были небольшие различия. По растянутости и массивности более высокие показатели имели баранчики ала-тоо — 71,2%, а у местных грубошерстных — 66,4%, или на 4,8% меньше, чем у баранчиков ала-тоо.

Ключевые слова: овцы, овцеводство, племенное животноводство, бараны-производители, овцематки, методика, индексы, живая масса, промеры

Для цитирования: 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>

Live weight and body features of Ala-Too sheep

ABSTRACT

Relevance. Sheep farming is the main livestock sector in the Kyrgyz Republic and is developing quite rapidly in the Russian Federation. Significant public demand for mutton poses challenges for breeders to improve local coarse-wool sheep by increasing their precocity, robustness, meat and fat productivity, ability to earn a high feed price, and maximum production under pasture conditions.

Methodology. Research was conducted to determine the productivity of stud rams and ewes in the development of the Ala-Too sheep breed, which produces meat and fat. The research was conducted at the Tagai-Tilek breeding farm in the Suzak district of the Jalal-Abad region and the Ak-Kula breeding farm in the Kara-Suu district of the Osh region of the Kyrgyz Republic. Live weight dynamics and body condition indices were studied.

Results. The productive advantages of the Ala-Too sheep breed have been revealed. The average live weight of Hissar breeding rams was 95.5 ± 2.14 kg, with a range of 85.6–103.7 kg, while that of local coarse-wool breeding rams was 61.4 ± 2.64 kg, or 33.5% lower. The average live weight of local coarse-wool ewes was 55.3 ± 0.41 kg, with a range of 52.3 to 59.4 kg. At birth, there were slight differences between the groups in the leg length index, bone content, and overgrowth of the rams. In terms of elongation and massiveness, ala-too sheep had higher rates — 71.2%, and local rough-haired sheep — 66.4%, or 4.8% less than ala-too sheep.

Keywords: sheep, sheep breeding, breeding livestock, sheep-producers, ewes, methodology, index, live weight, measurements

For citation: 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>

Введение/Introduction

Овцеводство является основной отраслью животноводства Кыргызской Республики [1–4]. Овцеводством киргизы занимались с древнейших времен, и оно играло важную роль в укладе жизни населения. Это было обусловлено тем, что в республике имеется большое количество естественных кормовых угодий высокогорных пастбищ (около 8,9 млн га), которые наиболее эффективно используются мелким рогатым скотом (овцами и козами) [5–7].

В условиях свободного рынка численность овец с учетом породности должна складываться в зависимости от потребностей рынка на ту или иную продукцию — как на внутреннем, так и на внешнем рынке [8]. В связи с этим в овцеводстве стран ЕАЭС¹ должно получить интенсивное развитие то направление производства, сырье которого востребовано собственной промышленностью и которое можно реализовать по более высоким ценам на внешнем рынке [9–13].

Значительный спрос населения на баранину ставит перед селекционерами задачи по совершенствованию местных грубошерстных овец в направлении повышения их скороспелости, крепости телосложения, мясо-сальной продуктивности, способности высоко оплачивать корм и давать максимум продукции в условиях пастбищного содержания² [14–16]. При интенсивном выращивании овец на мясо необходимо проводить научные исследования обмена веществ в организме животных, изучая и анализируя биохимические показатели крови с целью корректировки рационов кормления [17–19].

При оценке животных непременно принимается во внимание экстерьер, поскольку он служит одним из определяющих признаков породы. Каждая порода характеризуется экстерьерными особенностями, сформировавшимися в результате соответствующего отбора и селекции по внешним параметрам в конкретных условиях окружающей среды [20]. При изучении роста и развития овец от рождения и до взрослого состояния проводят линейные измерения отдельных статей тела, позволяющие оценить экстерьерные особенности подопытных особей [20–22].

Полученные данные свидетельствуют, что у баранчиков величина индекса растянутости за период от рождения до 12 мес. увеличилась на 30,9%, у валушков — на 31,2%, у ярочек — на 31,9%. Характерно, что величина индекса длинноногости с возрастом у молодняка всех групп уменьшилась. Это снижение у баранчиков составляло 10,2%, у валушков — 10,4%, у ярочек — 9,9%. [23].

В целом приведенные данные абсолютных промеров свидетельствуют о том, что, например, овцы эдильбаевской породы являются крупными животными, не уступающими по основным показателям экстерьера самой крупной породе мясосального направления — гиссарской. Сопоставление промеров ярков с промерами овцематок, закончивших свое развитие, свидетельствует о скороспелости эдильбаевской породы [24].

Генотипы имеют влияние на индексы телосложения баранчиков. Так, баранчики, имеющие гетерозиготный GNAB и гомозиготный GNBB генотип, превосходят баранчиков гомозиготного GNAA генотипа по высоте в холке на 1,4% и 3,12%, а также по высоте в крестце на 1,5% и 2,98%. По ширине груди баранчики гомозиготного GNBB генотипа имели преимущество и составили 25,10 см. Индексы телосложения баранчиков породы российский мясной меринос показали, что преимущество было у гомозиготных GNAA и GNBB генотипов по индексу длинноногости и массивности. Различия между показателями других индексов были незначительными [24–26].

Порода ала-тоо является одной из новых разработок ученых Кыргызстана³. Животные этой породы отличаются высокой приспособленностью к горно-пастбищным условиям содержания. Они имеют правильное телосложение и хорошо развитый крепкий костяк. Представители желательного типа характеризуются прочной конституцией, пропорциональными формами тела, правильным экстерьером без пороков и хорошо развитым выменем. Живая масса баранов достигает 115–125 кг, овцематок — 70–80 кг. Плодовитость и скороспелость высокие: от 100 маток получают 120–130 ягнят. Молодняк отличается хорошими приростами: при отъеме баранчики весят 45–50 кг, ярочки — 40–45 кг [4].

Овцы этой породы крупные и крепкие, с высокой мясо-сальной продуктивностью. Они быстро нагуливают массу, имеют хорошо развитый костяк, глубокую и широкую грудь, а также длинную ровную спину [4]. Одной из особенностей овец породы ала-тоо является их высокая плодовитость, которая в среднем составляет 120–130% и более, а также они обладают высокой молочной продуктивностью [27]. Перспективность данной породы и продуктивные качества делают ее важным объектом для дальнейшего улучшения овцеводства Кыргызской Республики.

Цель работы — оценка продуктивности овец породы ала-тоо мясо-сального направления продуктивности.

¹ Странами — участниками Евразийского экономического союза (ЕАЭС) являются Республика Армения, Республика Беларусь, Республика Казахстан, Кыргызская Республика и Российская Федерация.

² Ефимова Н.И., Шумаенко С.Н., Антоненко Т.И. Оценка и использование селекционно-генетических параметров в овцеводстве. Ставрополь, 2020.

³ Патент на селекционное достижение от 30.04.2025 № 68 Государственного агентства интеллектуальной собственности и инноваций при Правительстве Кыргызской Республики (Кыргызпатент). Порода овец ала-тоо мясо-сального направления. № заявки 202501.5 от 16.04.2025. Авторы: А.Х. Абдурасулов, К.К. Сатыбалдиев, С.А. Тойгонбаев, М.К. Курманбеков, О. Алимжанов, М.А. Каландаров, Т.А. Халыпов, Б.О. Акматов, Ө.И. Тагаев. Патентовладелец: Ошский государственный университет. Статус: действует.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Научно-исследовательские работы по изучению продуктивных и некоторых биологических особенностей породы овец ала-тоо и местной грубошерстной породы овец проводили в 2024–2025 гг. в условиях фермерского племенного завода «Акула» Карасуйского района, племенной фермы «Тагай-Тилек» и кафедры ветеринарной медицины и биотехнологии Института естествознания, физической культуры, туризма и аграрных технологий Ошского государственного университета (Кыргызская Республика).

Объектом исследований были овцы породы ала-тоо.

В качестве контрольной группы выступили местные грубошерстные овцы ($n = 10$).

В таблице 1 представлены группы и количество подопытных животных.

Подопытные животные были клинически здоровы, в оптимальных условиях горно-пастбищного содержания^{4, 5}. После отбивки ягнята находились на летних пастбищах при одинаковых условиях содержания и кормления. Пастбища представлены преимущественно горными и суходольными лугами с богатым разнотравьем, включая злаки и бобовые, что обеспечивает овец клетчаткой, белками и микроэлементами, но требует наличия водопоев и возможности сезонного выпаса для предотвращения деградации земель.

Правила кормления овец в Кыргызстане схожи с общемировыми нормами и включают в себя обеспечение баланса грубых, сочных и

Таблица 1. Группы и количество исследуемых животных
Table 1. Groups and number of animals studied

Пол животного	Порода	Количество животных, гол.		
		новорожденные (1-е сутки)	в 8 мес.	в 18 мес.
Баранчики	АЛ	61	56	35
	МГ х МГ	25	20	16
Ярки	АЛ	53	52	52
	МГ х МГ	26	25	25

Примечание: АЛ — порода овец ала-тоо, МГ х МГ — местная грубошерстная порода овец.

концентрированных кормов, а также минеральных добавок. Особое внимание следует уделять кормлению суягных и подсосных маток, а также молодняка, корректируя рацион в соответствии с сезоном и доступностью кормов, например использовать пастбища, сено, солому, силосы, корнеплоды и комбикорма.

Рацион молодняка включал в себя высококачественные грубые и концентрированные корма, обеспечивающие сбалансированное питание для достижения оптимального уровня продуктивности и здоровья животных⁶.

На рисунках 1, 2 представлены фотографии исследуемых животных.

Для эксперимента были выбраны по 10 животных каждой группы^{7–9}. Живую массу молодняка определяли путем индивидуального взвешивания животных с использованием электронных весов «ВСП4-ЖСО» («ВесСервис», Россия) утром за 2 часа до кормления и поения: у баранов-производителей и маток — перед осеменением, у молодняка — при рождении, отбивке, в 8-, 12- и

Рис. 1. Баран-производитель породы ала-тоо. Фото представлено А.Х. Абдурасуловым

Fig. 1. Ala-Too sheep. Photo presented by A.Kh. Abdurasulov



Рис. 2. Овцы местной грубошерстой породы. Фото представлено А.Х. Абдурасуловым.

Fig. 2. Sheep of the local coarse-wool breed. Photo presented by A.Kh. Abdurasulov



⁴ Племянников А.Г. Эффективность интенсивного выращивания и откорма ягнят. Научно-обоснованные методы выращивания и откорма овец. М.: Колос. 1986; 38.

⁵ Боголюбский С.Н. Развитие мясности овец и морфологические методы ее изучения: монография. Алма-Ата: Наука. 1971; 146.

⁶ Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справочное пособие. Под ред. А.П. Калашникова, В.И. Фисинина, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, 2003.

⁷ Подкорытов А.Т. Горное овцеводство: разведение, селекция, кормление, содержание, переработка, технология, экономика / Горно-Алтайский НИИ сельского хозяйства — филиал ФАНЦА. Барнаул: Азбука. 2019; 818.

⁸ Самусенко Л.Д. Разведение и основы зоотехнии, овцеводство. Учебное-методическое пособие. Орёл: Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина. 2021; 81.

⁹ Растопшина Л.В. Организация племенной работы в овцеводстве: учебно-методическое пособие. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет. 2016; 52. EDN QWCEDD

18-месячном возрасте с точностью до 0,1 кг с последующим вычислением среднесуточного прироста и коэффициента роста.

В работе использовали следующие методы измерения: для взятия промеров — измерительную ленту, измерительную палку и циркуль; для контроля измерительной ленты, измерительной палки и циркуля — линейку металлическую измерительную 1500 мм (Россия).

Проверка линейки осуществлена в Ошском центре испытаний, сертификации и метрологии (территориальное подразделение Центра по стандартизации и метрологии при Министерстве экономики и коммерции Кыргызской Республики).

Были взяты промеры:

- ✓ высота в холке (от земли до высшей точки холки);
- ✓ высота в крестце (от земли до наивысшей точки крестца);
- ✓ глубина груди (от холки до грудной кости);
- ✓ косая длина туловища (от переднего выступа плеча костного сочленения до заднего выступа седалищного бугра);
- ✓ ширина груди (по касательной к заднему углу лопаток);
- ✓ обхват груди (по касательной от холки до грудной кости);
- ✓ обхват пясти (в самой тонкой части пястной кости);
- ✓ обхват курдюка (по касательной к заднему углу лопаток).

Индексы телосложения у овец, как и у других сельскохозяйственных животных и птиц, используют для оценки пропорций тела и их соответствия желаемому типу сельскохозяйственных животных и птиц [28–30]. Они представляют собой соотношения различных промеров тела, выраженные в процентах, и помогают охарактеризовать экстерьер и конституцию животных.

Для характеристики телосложения животных и степени их развития в вышеуказанные возрастные периоды были вычислены индексы, представленные на рисунке 1.

Эксперименты проводили в соответствии с требованиями Директивы о защите животных, использующихся для научных целей¹⁰, и принципов обращения с животными, согласно статье 4 ФЗ РФ № 498-ФЗ¹¹ и статье 8 проекта закона Кыргызской Республики «О защите животных».

Рис. 3. Изучаемые индексы

Fig. 3. Studied index

Грудной — отношение ширины груди за лопатками к глубине груди	• (ширина груди) x 100 / глубина груди
Сбитости — отношение обхвата груди к косой длине туловища	• (обхват груди) x 100 / косая длина туловища
Растянутости — отношение длины туловища к высоте в холке	• (косая длина туловища) x 100 / высота в холке
Костистости — отношение обхвата пясти к высоте в холке	• (обхват пясти) x 100 / высота в холке
Длинноногости — относительное развитие ног в длину	• (высота в холке — глубина груди) x 100 / высота в холке
Массивности — отношение обхвата груди к высоте в холке	• (обхват груди) x 100 / высота в холке
Перерослости — отношение высоты в крестце к высоте в холке	• (высота в крестце) x 100 / высота в холке

Для статистического анализа использовали программное обеспечение Microsoft Excel (Microsoft, США).

Материалы исследований обрабатывали методом вариационной статистики (Н.А. Плохинский, 1969 г.)¹², вычисляли среднюю арифметическую ($\bar{X}$) и ошибку средней арифметической ($\pm Sx$).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В настоящих исследованиях изучены изменения живой массы ала-тоо (АЛ) и местных грубошерстных (МГ x МГ) ягнят в разные возрастные периоды.

При сравнении живой массы новорожденных ягнят выявлено, что баранчики ала-тоо превосходили местных грубошерстных сверстников на 2,35 кг, а ярки — на 2,45 кг.

Живая масса у помесных баранчиков в 8-месячном возрасте в среднем составила $55,6 \pm 0,34$ кг, или была на 18,9 кг больше, чем у баранчиков контрольной группы, у ярок, соответственно, $45,6 \pm 0,27$, или на 12,2 кг больше.

Аналогичные показатели были по живой массе у баранчиков и в годовалом, и 1,5-летнем возрасте.

В таблице 2 приведена динамика прироста живой массы ягнят от рождения до 18-месячного возраста.

Абсолютный прирост живой массы у помесей от отбивки до 8-месячного возраста составил у баранчиков 12,2 кг, у ярок — 10,5 кг. Среднесуточный прирост у помесных баранчиков был равен 101,7 г, у ярок — 87,5 г. Разница с контрольной группой составила по абсолютному приросту, соответственно, 2,8 кг и 0,5 кг, по среднесуточному — 23,4 г и 4,2 г в пользу помесных баранчиков и ярок.

Помесный молодняк характеризуется достаточно высокой интенсивностью роста в подсосном периоде. Абсолютный прирост живой массы

¹⁰ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях. https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063_rus.pdf

¹¹ Федеральный закон от 27.12.2018 № 498-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

¹² Плохинский Н.А. Биометрия. 2-е изд. М.: Изд-во Московского университета. 1970.

Таблица 2. Динамика живой массы ягнят от рождения до 18-месячного возраста, кг

Table 2. Dynamics of live weight of lambs from birth to 18 months of age, kg

Пол животного	Породность	Новорожденные		в 8 месяцев		в 18 месяцев	
		n	M ± m	n	M ± m	n	M ± m
Баранчики	АЛ	61	6,65 ± 0,91	56	55,6 ± 0,34	35	85,50 ± 0,54
	МГхМГ	25	4,03 ± 0,25	20	36,70 ± 0,47	16	58,50 ± 0,19
Ярки	АЛ	53	5,25 ± 0,85	52	45,60 ± 0,27	52	68,70 ± 0,35
	МГхМГ	26	3,80 ± 0,20	25	33,40 ± 0,30	25	47,40 ± 1,03

от 8 до 18 месяцев у помесных баранчиков в настоящем опыте составил: 4,7 кг — у местных грубошерстных ягнят, 5,9 кг — у ягнят опытной группы, то есть у помесей был на 1,2 кг больше. У помесных ярок абсолютный прирост живой массы за данный период составил 3,4 кг, в контроле — 3,3 кг, или на 0,1 кг был выше у помесей.

Абсолютный прирост живой массы от 8- до 18-месячного возраста у баранчиков ала-тоо составлял 20,3 кг, среднесуточный прирост — 112,8 г, у местных грубошерстных баранчиков всего на 4,6 кг был меньше. У ярок породы ала-тоо показатели были выше, соответственно, на 5,5 кг и на 30,6 г, чем у местных грубошерстных овец.

В целом за весь период выращивания абсолютный прирост живой массы от рождения до 1,5-летнего (18 мес.) возраста у баранчиков породы ала-тоо составлял 78,85 кг, а у местных грубошерстных — 54,2 кг (средняя разница 24,65 кг). У ярок показатели, соответственно, составляли 63,45 кг и 43,6 кг (средняя разница 19,85 кг).

Понятие «конституция овец» объединяет все свойства организма, в том числе племенные качества. С конституцией связаны состояние

здоровья, жизнестойкость, сопротивляемость, скороспелость, плодовитость, продолжительность жизни и работоспособность животного [31–33].

Правильному пониманию экстерьеря и его роли в оценке хозяйственной ценности животных посвящены труды многих ученых. По экстерьеру можно сделать заключение о развитии внутренних органов, о конституциональной крепости, здоровье животного и приспособленности к условиям разведения, о породных особенностях и экстерьерных недостатках, а также о соответствии особенностей его телосложения направлению продуктивности [34–36].

Для получения более полной оценки роста и развития породы ала-тоо и чистопородного молодняка были взяты экстерьерные промеры и вычислены основные индексы телосложения животных разных генотипов.

В таблицах 3–6 приведены данные возрастных изменений промеров животных, дающих наиболее полное представление о пропорциях телосложения у исследуемых особей, полученных при межпородном скрещивании.

Таблица 3. Экстерьерные промеры баранчиков разных генотипов (M ± m, см)

Table 3. Exterior measurements of rams of different genotypes (M ± m, cm)

Породность	Высота в холке	Высота в крестце	Глубина груди	Косая длина туловища	Ширина груди	Обхват груди	Обхват пясти	Обхват курдюка
Новорожденные								
АЛ	46,80 ± 0,51	48,60 ± 0,34	20,40 ± 0,37	33,50 ± 0,36	14,70 ± 0,28	43,70 ± 0,41	6,80 ± 0,41	22,80 ± 0,42
МГ х МГ	41,40 ± 0,24	43,40 ± 0,38	17,60 ± 0,34	29,30 ± 0,42	11,70 ± 0,43	38,60 ± 0,38	6,20 ± 0,37	17,40 ± 0,47
В возрасте 8 мес.								
АЛ	67,80 ± 0,54	69,70 ± 0,32	31,50 ± 0,52	66,70 ± 0,61	18,80 ± 0,41	78,70 ± 0,35	8,90 ± 0,42	96,40 ± 0,37
МГ х МГ	59,40 ± 0,42	61,40 ± 0,37	26,70 ± 0,28	58,10 ± 0,47	14,90 ± 0,45	69,40 ± 0,34	8,20 ± 0,47	79,40 ± 0,41
В возрасте 18 мес.								
АЛ	84,30 ± 0,34	86,60 ± 0,47	51,50 ± 0,37	85,80 ± 0,67	38,70 ± 0,44	112,40 ± 0,51	10,40 ± 0,45	109,40 ± 0,38
МГ х МГ	69,80 ± 0,54	71,70 ± 0,41	39,50 ± 0,27	70,80 ± 0,47	29,50 ± 0,41	93,40 ± 0,54	9,10 ± 0,42	92,30 ± 0,31

Таблица 4. Индексы телосложения у баранчиков разных генотипов, %

Table 4. Body condition indices of rams of different genotypes, %

Породность	Показатели						
	длинноногости	растянутости	грудной	сбитости	массивности	костистости	перерослости
Новорожденные							
АЛ	56,41	71,58	72,06	130,40	93,37	14,52	103,80
МГ	57,48	70,77	66,48	131,70	93,23	14,97	104,80
В возрасте 8 мес.							
АЛ	53,53	98,37	59,68	117,90	116,00	13,12	102,80
МГ	55,05	97,81	55,80	119,40	116,80	13,80	103,30
В возрасте 18 мес.							
АЛ	38,90	101,70	75,14	131,00	133,30	12,33	102,70
МГ	43,40	101,40	74,68	131,90	133,80	13,03	102,70

Таблица 5. Экстерьерные промеры ярок разных генотипов ($M \pm m$, см)

Table 5. Exterior measurements of ewes of different genotypes ($M \pm m$, cm)

Породность	Высота в холке	Высота в крестце	Глубина груди	Косая длина туловища	Ширина груди	Обхват груди	Обхват пясти	Обхват курдюка
Новорожденные								
АЛ	45,40 ± 0,57	47,80 ± 0,54	20,30 ± 0,34	32,80 ± 0,47	13,40 ± 0,31	42,10 ± 0,37	6,80 ± 0,44	22,70 ± 0,41
МГ х МГ	39,50 ± 0,64	41,40 ± 0,43	16,50 ± 0,41	26,70 ± 0,32	10,40 ± 0,42	36,40 ± 0,28	6,10 ± 0,35	16,20 ± 0,35
В возрасте 8 мес.								
АЛ	61,50 ± 0,34	63,70 ± 0,34	28,70 ± 0,28	62,40 ± 0,41	21,20 ± 0,41	75,60 ± 0,47	8,80 ± 0,42	84,80 ± 0,52
МГ х МГ	54,40 ± 0,42	58,50 ± 0,43	23,70 ± 0,45	57,30 ± 0,38	14,70 ± 0,43	66,80 ± 0,39	8,00 ± 0,34	70,30 ± 0,49
В возрасте 18 мес.								
АЛ	80,50 ± 0,41	86,70 ± 0,47	38,10 ± 0,28	88,50 ± 0,51	28,70 ± 0,44	105,40 ± 0,42	10,10 ± 0,47	101,40 ± 0,35
МГ х МГ	64,80 ± 0,54	68,60 ± 0,42	33,80 ± 0,19	67,70 ± 0,40	25,30 ± 0,41	92,60 ± 0,43	8,70 ± 0,35	79,70 ± 0,42

Таблица 6. Индексы телосложения у ярок разных генотипов, %

Table 6. Body constitution indices of ewes of different genotypes, %

Породность	Показатели						
	длинноности	растянутости	грудной	сбитости	массивности	костистости	перерослости
Новорожденные							
АЛ	55,28	72,24	66,00	128,30	92,73	14,97	105,20
МГ х МГ	58,22	67,59	63,03	136,30	92,15	15,44	104,80
В возрасте 8 мес.							
АЛ	53,33	101,40	73,86	121,10	122,90	14,30	103,50
МГ х МГ	57,97	101,50	62,02	116,50	118,40	14,18	103,70
В возрасте 18 мес.							
АЛ	54,91	104,70	75,32	119,00	124,70	11,95	102,60
МГ х МГ	49,40	101,30	74,85	136,70	138,60	13,02	102,60

Как показывают данные таблиц 3, 4, новорожденные баранчики породы ала-тоо по основным промерам превосходили своих сверстников местных грубошерстных баранчиков. У ярок от рождения до 1,5-летнего возраста превосходство имели животные породы ала-тоо.

Выявлены возрастные изменения промеров, связанные с интенсивностью роста и развития отдельных частей тела у молодняка разных генотипов. Для подтверждения выявленных различий исчислены индексы телосложения, которые полнее характеризуют его особенности и в наибольшей степени дают возможность судить о развитии организма и пропорциях его тела в динамике (табл. 5, 6).

Новорожденные баранчики по индексу длинноности, костистости и перерослости имели небольшие различия между группами. По растянутости и массивности наиболее высокие показатели имели баранчики породы ала-тоо — 71,2%, а у местных грубошерстных — 66,4%, или на 4,8% меньше.

Необходимость проведения дальнейших исследований по совершенствованию пород овец, увеличению эффективности овцеводства представлена в многочисленных публикациях [37, 38], которые

подчеркивают важность селекционной работы, улучшения кормовой базы и пастбищ, внедрения новых технологий для увеличения продуктивности и получения высококачественной продукции [39–41].

Выводы/Conclusions

Преимущества продуктивных свойств овец породы ала-тоо заключаются в следующих особенностях. По росту и развитию ягнята породы ала-тоо превосходили своих сверстников. Новорожденные баранчики ала-тоо имели живую массу 6,65 кг, ярки — 5,25 кг, а в возрасте 8 месяцев, соответственно, 35,4 кг и 31,2 кг. За период выращивания (до 1,5-летнего возраста) абсолютный прирост живой массы у баранчиков породы ала-тоо составил 78,85 кг, у местных грубошерстных — 54,2 кг, молодняк имел более высокий рост и пропорциональное телосложение.

При отбивке и в 18-месячном возрасте по индексу костистости установлено наибольшее различие в пользу баранчиков породы ала-тоо. По всем индексам телосложения ярки ала-тоо имели выше показатели, чем местные грубошерстные ярки.

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 за счет внутреннего грантового проекта Ошского государственного университета и ассоциации по разведению овец породы ала-тоо.

FUNDING

The research was carried out at the expense of an internal grant project from Osh State University and the Ala-too Sheep Breeding Association.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маткеримова А.М., Мамыркулова Д.Р. Овцеводство в Кыргызстане: состояние и перспективы развития. *Актуальные вопросы современной экономики*. 2024; (1): 417–422. <https://elibrary.ru/itbfxu>
2. Мамыркулова Дж.Р. Овцеводство и козоводство как основы социально-экономического развития Кыргызстана. *Наука. Образование. Техника*. 2025; (1): 107–111. <https://elibrary.ru/hfnool>
3. Джаилов Дж.С., Джумабаев А.К. Пути развития животноводческой отрасли сельского хозяйства в Кыргызской Республике. *Известия вузов Кыргызстана*. 2024; (5): 164–169 (на кыргыз. яз.). <https://elibrary.ru/guztiti>
4. Абдурасулов А.Х., Аттукуров К.Ш., Кадыров Б.Ж., Аvezimbetov Ш.Д. Овцеводство и козоводство как перспективные виды животноводства Кыргызской Республики. *Current Problems of the Sericulture Field in New Uzbekistan and Their Scientific Solutions Based on Innovative Technologies. I International Scientific and Practical Conference*. 2025; 5–12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15375772>
5. Никонова Е.А. и др. Эффективность выращивания чистопородных и помесных баранчиков. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехника*. 2023; (4): 164–170. https://doi.org/10.52754/16948696_2023_4_24
6. Джаилов Дж.С., Джумабаев А.К. Пути рационального использования пастбищ в развитии отраслей животноводства в Кыргызской Республике. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2024; (9): 78–81 (на кыргыз. яз.). <https://elibrary.ru/gzmsyq>
7. Сейталиев А.Т., Турдубаев Т.Ж., Альмеев И.А., Кумашев М.Р., Маширапов А.Т. Развитие мясного козоводства в условиях Кыргызстана. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024; (2): 329–333. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2024-106-2-329-333>
8. Герасимова Т.Г., Ребезов М.Б., Лукин Е.В. Шерстная продуктивность овец разного генотипа. *Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. Сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти доктора биологических наук, профессора, заслуженного работника Высшей школы РФ, почетного работника высшего профессионального образования РФ, почетного гражданина Брянской области Е.П. Ващекина*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2022; 1: 300–303. <https://elibrary.ru/fkpdfx>
9. Посохова И.С., Чепуштанова О.В. Народно-хозяйственное значение овцеводства и козоводства. *Актуальные проблемы животноводства. Сборник тезисов, подготовленный по материалам круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 291–292. <https://elibrary.ru/ouugvu>
10. 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>
11. Доронин Б.А., Павлюк Р.В. Направления повышения эффективности производства продукции овцеводства в современных условиях. *Современные проблемы АПК. Сборник научных статей Института механики и энергетики, приуроченный к 90-й научно-практической конференции «Аграрная наука — Северо-Кавказскому федеральному округу»*. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет. 2025; 366–375. <https://elibrary.ru/rkbusc>
12. Юлдашбаев Ю.А., Корнеев-Жилыева С.А., Пахомова Е.В., Науменко И.Б. Перспективы развития мясного и молочного овцеводства. *Зоотехническая и ветеринарная наука — основа инновационного развития животноводства России. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Института зоотехнии и биологии РГАУ — МСХА им. К.А. Тимирязева*. М.: РГАУ — МСХА им. К.А. Тимирязева. 2024; 128–133. <https://elibrary.ru/nqqphm>
13. Гусева П.Н., Ульянов А.Г. Интенсификация производства баранины. *Теория и практика инновационных технологий в АПК. Материалы Национальной научно-практической конференции*. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет. 2024; 1: 328–332. <https://elibrary.ru/dmeuum>
14. Самусенко Л.Д., Мамаев А.В., Химичева С.Н., Родина Н.Д., Сергеева Е.Ю. Модель биоэнергетической оценки и прогнозирования шерстной продуктивности в овцеводстве. *Аграрная наука*. 2025; (9): 54–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-54-61>

REFERENCES

1. Matkerimova A.M., Mamyrkulova D.R. Sheep farming in Kyrgyzstan: the state and prospects of development. *Current Issues of Modern Economics*. 2024; (1): 417–422 (in Russian). <https://elibrary.ru/itbfxu>
2. Mamyrkulova J.R. Sheep and goat farming as the foundations of socio-economic development in Kyrgyzstan. *Science. Education. Engineering*. 2025; (1): 107–111 (in Russian). <https://elibrary.ru/hfnool>
3. Dzhaailov J.S., Dzhumabaev A.K. Ways to develop the livestock sector of agriculture in the Kyrgyz Republic. *Izvestiya vuzov Kyrgyzstana*. 2024; (5): 164–169 (in Kyrgyz). <https://elibrary.ru/guztiti>
4. Abdurasulov A.Kh., Attokurov K.Sh., Kadyrov B.Zh., Avezimbetov Sh.D. Sheep and goat breeding as promising types of animal husbandry in the Kyrgyz Republic. *Current Problems of the Sericulture Field in New Uzbekistan and Their Scientific Solutions Based on Innovative Technologies. I International Scientific and Practical Conference*. 2025; 5–12 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15375772>
5. Nikonova E.A. et al. The effectiveness of growing purebred and crossbred sheep. *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
6. Dzhaailov J.S., Dzhumabaev A.K. Ways for rational use of pasture during the in the development of livestock production in the Kyrgyz Republic. *Science, New Technologies and Innovations in Kyrgyzstan*. 2024; (9): 78–81 (in Kyrgyz). <https://elibrary.ru/gzmsyq>
7. Seytaliev A.T., Turdubaev T.Zh., Almeev I.A., Kumashev M.R., Mashirapov A.T. Development of meat goat farming in the conditions of Kyrgyzstan. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024; (2): 329–333 (in Russian). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2024-106-2-329-333>
8. Gerasimova T.G., Rebezov M.B., Lukin E.V. Wool productivity of sheep of different genotypes. *Actual problems of intensive development of animal husbandry. Collection of papers based on the materials of the National scientific and practical conference with international participation dedicated to the memory of Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Citizen of the Bryansk Region E.P. Vashchekin*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2022; 1: 300–303 (in Russian). <https://elibrary.ru/fkpdfx>
9. Posokhova I.S., Chepushtanova O.V. The national economic importance of sheep and goat breeding. *Actual problems of animal husbandry. A collection of abstracts prepared based on the materials of the round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 291–292 (in Russian). <https://elibrary.ru/ouugvu>
10. 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>
11. Doronin B.A., Pavlyuk R.V. Directions for increasing the efficiency of sheep production in modern conditions. *Modern problems of the agro-industrial complex. Collection of scientific articles of the Institute of Mechanics and Power Engineering, dedicated to the 90th scientific and practical conference "Agrarian Science — to the North Caucasian Federal District"*. Stavropol: Stavropol State Agrarian University. 2025; 366–375 (in Russian). <https://elibrary.ru/rkbusc>
12. Yuldashbayev Yu.A., Korneyenko-Zhilyaeva S.A., Pakhomova E.V., Naumenko I.B. Prospects for the development of meat and dairy sheep breeding. *Zootechnical and veterinary science — the basis for the innovative development of animal husbandry in Russia. Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the founding of the Institute of Animal Science and Biology of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy*. Moscow: Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 2024; 128–133 (in Russian). <https://elibrary.ru/nqqphm>
13. Guseva P.N., Ulyanov A.G. Intensification of lamb production. *Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex. Proceedings of the National scientific and practical conference*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University. 2024; 1: 328–332 (in Russian). <https://elibrary.ru/dmeuum>
14. Samusenko L.D., Mamaev A.V., Khimicheva S.N., Rodina N.D., Sergeeva E.Yu. A model of bioenergetic assessment and forecasting of wool productivity in sheep breeding. *Agrarian science*. 2025; (9): 54–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-54-61>

15. Джатдоев Х.М., Эркенов Т.А. Полиморфизм некодирующих последовательностей у овец каракаевской породы. *Аграрная наука*. 2024; (12): 109–112. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-109-112>
16. Мороз В.А., Чернобай Е.Н., Новгородова Н.А., Сердюков И.Г. Живая масса и экстерьерные особенности овец от однородного и разнородного подбора. *Вестник Курганской ГСХА*. 2017; (2): 51–53. <https://elibrary.ru/ytbeor>
17. 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): 197–201. <https://elibrary.ru/bqyovo>
18. Траисов Б.Б., Бейшова И.С., Юлдашбаев Ю.А., Косилов В.И., Никонова Е.А. Морфологические и биохимические показатели крови полутонкорунных овец. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022; (2): 315–319. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-315-319>
19. Андриенко Д.А., Траисов Б.Б., Ребезов М.Б., Галиева З.А. Морфологический состав туш молодняка овец ставропольской породы на Южном Урале. *Наука и образование*. 2020; (3–1): 20–25. <https://elibrary.ru/gpvhdh>
20. Юлдашбаев Ю.А., Донгак М.И., Чылбак-Оол С.О. Экстерьерные показатели маток тувинской короткожирнохвостой породы с разным типом пищевого поведения. *Аграрная наука*. 2018; (10): 25–27. <https://elibrary.ru/ymrsqx>
21. Карынбаев А.К., Тастанбеков К., Юлдашбаев Ю.А. Использование индексных методов в селекции серых каракульских овец серебристой расцветки. *Аграрная наука*. 2018; (6): 35–37. <https://elibrary.ru/uvbyny>
22. 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: Матбаа. 2021; 218–223. <https://elibrary.ru/rmetko>
23. Косилов В.И., Абдурасулов А.Х. Линейный рост молодняка овец южноуральской породы. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2025; (1): 179–184. <https://elibrary.ru/amlrux>
24. Хамзина А.К., Смагулов Д.Б., Хамзин К.П., Есенгалиев Д.К. Экстерьерные особенности овец различного направления продуктивности. *Наука и образование*. 2022; (3–2): 38–54. <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2022-3-2-38-54>
25. Онищенко О.Н., Чернобай Е.Н. Экстерьерные особенности баранчиков породы российский мясной меринос разных генотипов. *Современные способы повышения продуктивных качеств сельскохозяйственных животных. Сборник статей Международной научно-практической конференции*. Саратов. 2023; 43–46. <https://elibrary.ru/fmoeeo>
26. Онищенко О.Н., Хоришко П.А., Коноплев В.И., Ефимова Н.И. Продуктивные и экстерьерные особенности овец породы советский меринос в зависимости от типов складчатости кожи. *Вестник Курганской ГСХА*. 2022; (3): 45–50. https://doi.org/10.52463/22274227_2022_43_45
27. Абдурасулов А.Х., Каландаров М.А. Методика определения молочности и молочной продуктивности овец. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2025; (1): 185–190. <https://elibrary.ru/nhdbdb>
28. Гриценко С.А., Белококов А.А., Ермолов С.М., Ребезов М.Б., Гриценко М.Д. Показатели экстерьера свинок материнской породы на различных этапах онтогенеза. *Аграрная наука*. 2025; (9): 45–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-45-53>
29. Гриценко С.А., Ребезов М.Б., Соломаха С.В. Показатели убоя товарных гибридов F2 свиней в зависимости от показателей линейного роста ремонтных свинок материнской породы (ММ). *Всё о мясе*. 2024; (6): 46–52. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-6-46-52>
30. Белококова О.В., Ребезов М.Б., Ленникова М.Г., Зяблицева М.А. Влияние зоогигиенических параметров на мясную продуктивность свиней. *Вестник Ошского государственного университета. Сельское хозяйство: агрономия, ветеринария и зоотехния*. 2024; (4): 52–64. <https://elibrary.ru/bgjwve>
31. Сучкова Д.А., Чепуштанова О.В. Конституция овец и коз. *Актуальные проблемы животноводства. Сборник тезисов, подготовленный по материалам круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 336–337. <https://elibrary.ru/wgdfev>
15. Dzhatdov Kh.M., Erkenov T.A. Polymorphism of non-coding sequences in Karachai sheep. *Agrarian science*. 2024; (12): 109–112 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-109-112>
16. Moroz V.A., Chernobay E.N., Novgorodova N.A., Serdyukov I.G. Live weight and exteriors of sheep from homogeneous and heterogeneous selection. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2017; (2): 51–53 (in Russian). <https://elibrary.ru/ytbeor>
17. Kosilov V.I., Rakhimzhanova I.A., Rebezov M.B., Gubaidullin 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>
18. Traisov B.B., Beishova I.S., Yuldashbaev Yu.A., Kosilov V.I., Nikonova E.A. Morphological and biochemical parameters of blood of semi-fine-fleeced sheep. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022; (2): 315–319 (in Russian). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-315-319>
19. Andrienko D.A., Traisov B.B., Rebezov M.B., Galieva Z.A. Morphological composition of carcasses of young Stavropol sheep in the Southern Urals. *Science and Education*. 2020; (3–1): 20–25 (in Russian). <https://elibrary.ru/gpvhdh>
20. Yuldashbaev Yu.A., Dongak M.I., Chylbak-Ool S.O. Body conformation of Tuvian short-fat-tailed ewes with different types of feeding behavior. *Agrarian science*. 2018; (10): 25–27 (in Russian). <https://elibrary.ru/ymrsqx>
21. Karynbaev A.K., Tastanbekov K., Yuldashbaev Yu.A. Index methods in the selection of Gray Karakul sheep of silver coloring. *Agrarian science*. 2018; (6): 35–37 (in Russian). <https://elibrary.ru/uvbyny>
22. 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: Matbaa. 2021; 218–223 (in Russian). <https://elibrary.ru/rmetko>
23. Kosilov V.I., Abdurasulov A.Kh. Linear growth of young sheep of the South Ural breed. *Journal of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary and zootechnics*. 2025; (1): 179–184 (in Russian). <https://elibrary.ru/amlrux>
24. Khamzina A.K., Smagulov D.B., Khamzin K.P., Yesengaliyev D.K. Exterior features of sheep different directions of productivity. *Science and education*. 2022; (3–2): 38–54 (in Russian). <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2022-3-2-38-54>
25. Onishchenko O.N., Chernobay E.N. Exterior features of Russian Meat Merino rams of different genotypes. *Modern methods of improving the productive qualities of farm animals. Collection of articles of the International scientific and practical conference*. Saratov. 2023; 43–46 (in Russian). <https://elibrary.ru/fmoeeo>
26. Onishchenko O.N., Khorishko P.A., Konoplev V.I., Efimova N.I. Productive and exterior features of sheep of the Soviet Merino breed depending on the types of skin folding. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2022; (3): 45–50 (in Russian). https://doi.org/10.52463/22274227_2022_43_45
27. Abdurasulov A.Kh., Kalandarov M.A. The method of determining the milk content and milk productivity of sheep. *Journal of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary and zootechnics*. 2025; (1): 185–190 (in Russian). <https://elibrary.ru/nhdbdb>
28. Gritsenko S.A., Belokov A.A., Ermolov S.M., Rebezov M.B., Gritsenko M.D. Exterior indicators of maternal breed pigs at different stages of ontogenesis. *Agrarian science*. 2025; (9): 45–53 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-45-53>
29. Gritsenko S.A., Rebezov M.B., Solomakha S.V. Indicators of slaughter of commercial F2 pig hybrids depending on the indicators of linear growth of replacement pigs of the maternal breed (MM). *Vsyo o myase*. 2024; (6): 46–52. (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-6-46-52>
30. Belookova O.V., Rebezov M.B., Lennikova M.G., Zyablitseva M.A. The influence of zoohygienic parameters on the meat productivity of pigs. *Journal of Osh State University. Agriculture: agronomy, veterinary and zootechnics*. 2024; (4): 52–64 (in Russian). <https://elibrary.ru/bgjwve>
31. Suchkova D.A., Chepushtanova O.V. Constitution of sheep and goats. *Actual problems of animal husbandry. Collection of abstracts prepared based on the materials of the round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 336–337 (in Russian). <https://elibrary.ru/wgdfev>

32. Сучкова Д.А., Чепуштанова О.В. Пороки и недостатки экстерьера овец и коз. *Актуальные проблемы животноводства. Сборник тезисов, подготовленный по материалам круглого стола*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2024; 338–339.
<https://elibrary.ru/odnrxl>

33. Косилов В.И., Андриенко Д.А., Никонова Е.А., Иргашев Т.А., Юлдашбаев Ю.А. Конституционные особенности молодняка овец Ставропольской породы на Южном Урале. *Актуальные проблемы развития гиссарской породы овец. Материалы III Международной научно-практической конференции*. Душанбе: Бебок. 2024; 137–141.
<https://elibrary.ru/itrlmj>

34. Сат А.А. Экстерьерно-продуктивные показатели овец тувинской короткожирнохвостой породы. *Студенческая наука — взгляд в будущее. Материалы XVIII Всероссийской студенческой научной конференции*. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет. 2023; 2: 320–322.
<https://elibrary.ru/mlxnaj>

35. Гишларкаев А.Е., Пономарев В.В., Гиро М.В., Филиппова В.В. Оценка экстерьерных показателей баранов-производителей эдильбаевской породы. *Зоотехническая наука в условиях современных вызовов. Сборник трудов VI научно-практической конференции с международным участием*. Киров: Вятский государственный агротехнологический университет. 2024; 77–79.
<https://elibrary.ru/lskkbi>

36. Клуниченко В.С. Экстерьерные показатели овцематок эдильбаевской породы разного возраста в условиях ТОО «Сана-Агро». *Идеи молодых ученых — агропромышленному комплексу: зоотехния и технология переработки сельскохозяйственной продукции. Материалы студенческой научной конференции Института ветеринарной медицины*. Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет. 2023; 94–99.
<https://elibrary.ru/cnhvbq>

37. Ataybekov B.Y., Prmanshaev M., Chortonbaev T.D., Bekturov A., Shergaziev U.A. Meat productivity and interior features of fat-tailed coarse wool lambs in the south-east of Kazakhstan. *BIO Web of Conferences*. 2024; 83: 01006.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20248301006>

38. Zholborsov U.K., Chortonbaev T.D., Azhibekov A.S., Bekturov A. Biological and productive features of Kyrgyz mountain merino breed types in different climatic zones. *BIO Web of Conferences*. 2024; 83: 01005.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20248301005>

39. Забелина М.В., Амиан А.А. Оценка показателей убоя баранчиков эдильбаевской породы в зависимости от молочной продуктивности овцематок. *Аграрная наука*. 2024; (8): 112–117.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-112-117>

40. Гаглов А.Ч., Щугорева М.С. Мясная продуктивность баранчиков при использовании экспериментальной комплексной витаминно-минеральной добавки. *Аграрная наука*. 2024; (4): 59–64.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-381-4-59-64>

41. 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>

ОБ АВТОРАХ

Абдугани Холмурзаевич Абдурасулов¹

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой ветеринарной медицины и биотехнологии
aabdurasulov@oshsu.kg
<https://orcid.org/0000-0003-3714-6102>

Мыктыбек Адилбекович Каландаров²

начальник управления племенного животноводства, пастбищ и кормов
mikish87@mail.ru

Максим Борисович Ребезов^{3,4}

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

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

32. Suchkova D.A., Chepushtanova O.V. Defects and shortcomings of the exterior of sheep and goats. *Actual problems of animal husbandry. Collection of abstracts prepared based on the materials of the round table*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2024; 338–339 (in Russian).
<https://elibrary.ru/odnrxl>

33. Kosilov V.I., Andrienko D.A., Nikonova E.A., Irgashev T.A., Yuldashbaev Yu.A. Constitutional features of young Stavropol sheep in the Southern Urals. *Actual Problems of Development of the Gissar Sheep Breed. Proceedings of the III International scientific and practical conference*. Dushanbe: Bebok. 2024; 137–141 (in Russian).
<https://elibrary.ru/itrlmj>

34. Sat A.A. Exterior and productive indicators of sheep of the Tuvan short-tailed breed. *Student science — a look into the future. Proceedings of the XVIII All-Russian student scientific conference*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. 2023; 2: 320–322 (in Russian).
<https://elibrary.ru/mlxnaj>

35. Gishlarkaeve A.E., Ponomarev V.V., Giro M.V., Filippova V.V. Assessment of the exterior indicators of sheep producers of the Edilbaevsky breed. *Zootechnical science in the context of modern challenges. Collection of works of the VI scientific and practical conference with international participation*. Kirov: Vyatka State Agrotechnological University. 2024; 77–79 (in Russian).
<https://elibrary.ru/lskkbi>

36. Klunichenko V.S. Exterior indicators of Edilbaev breed ewes of different ages in the conditions of Sana-Agro LLC. *Ideas of young scientists — to the agro-industrial complex: zootechnics and technology of processing agricultural products. Proceedings of the student scientific conference of the Institute of Veterinary Medicine*. Chelyabinsk: South Ural State Agrarian University. 2023; 94–99 (in Russian).
<https://elibrary.ru/cnhvbq>

37. Ataybekov B.Y., Prmanshaev M., Chortonbaev T.D., Bekturov A., Shergaziev U.A. Meat productivity and interior features of fat-tailed coarse wool lambs in the south-east of Kazakhstan. *BIO Web of Conferences*. 2024; 83: 01006.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20248301006>

38. Zholborsov U.K., Chortonbaev T.D., Azhibekov A.S., Bekturov A. Biological and productive features of Kyrgyz mountain merino breed types in different climatic zones. *BIO Web of Conferences*. 2024; 83: 01005.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20248301005>

39. Zabelina M.V., Amiyana A.A. Evaluation of the slaughter indicators of the Edilbaevsky sheep breed depending on the milk productivity of sheep. *Agrarian science*. 2024; (8): 112–117 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-385-8-112-117>

40. Gaglov A.Ch., Shchugoreva M.S. Meat productivity of lambs when using an experimental complex vitamin-mineral additive. *Agrarian science*. 2024; (4): 59–64 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-381-4-59-64>

41. 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>

ABOUT THE AUTHORS

Abdugani Kholmurzaevich Abdurasulov¹

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Veterinary Medicine and Biotechnology
aabdurasulov@oshsu.kg
<https://orcid.org/0000-0003-3714-6102>

Myktybek Adilbekovich Kalandarov²

Head of the Department of Breeding Livestock, Pastures and Forage
mikish87@mail.ru

Maksim Borisovich Rebezov^{3,4}

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

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

Владимир Иванович Косилов⁵

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства

kosilov_vi@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4754-1771>

¹Ошский государственный университет,
ул. Алымбек Датка, 331, Ош, 723500, Кыргызстан

²Служба ветеринарии, развития животноводства, пастбищ и кормов при Министерстве водных ресурсов, сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Кыргызской Республики,
Киевская ул., 96А, Бишкек, 720040, Кыргызстан

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

⁵Оренбургский государственный аграрный университет,
ул. Челюскинцев, 18, Оренбург, 460014, Россия

Vladimir Ivanovich Kosilov⁵

Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Technology of Production and Processing of Livestock Products

kosilov_vi@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4754-1771>

¹Osh State University,
331 Alymbek Datka Str., Osh, 723500, Kyrgyzstan

²Veterinary, Livestock, Pasture, and Forage Development Service of the Ministry of Water Resources, Agriculture, and Processing Industry of the Kyrgyz Republic,
96A Kiyevskaya Str., Bishkek, 720040, Kyrgyzstan

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

⁴Ural State Agrarian University,
42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, 620075, Russia

⁵Orenburg State Agrarian University,
18 Chelyuskintsev Str., Orenburg, 460014, Russia



21-23
октября
2025

● ЖИВОТНОВОДСТВО

● ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

● РАСТЕНИЕВОДСТВО

● КОРМОПРОИЗВОДСТВО

● ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

● ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ. НАПИТКИ.
ОБОРУДОВАНИЕ. HoReCa

● СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ТЕХНИКА

● ПЕРЕРАБОТКА И ЭКСПОРТ

● ВЕТЕРИНАРНЫЙ КОНГРЕСС

● СЪЕЗД ФЕРМЕРОВ

НАСЫЩЕННАЯ ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

Место проведения: г. Новокузнецк, ул. Автотранспортная, 51,
ВК «Кузбасская ярмарка», тел: +7 (3843) 32-11-16, 8-951-587-9690
www.kuzbass-fair.ru



УДК 619:616.98:579.852.13

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-81-90

Е.А. Йылдырым^{1,2} ✉, Л.А. Ильина^{1,2},
Г.Ю. Лаптев¹, В.А. Филиппова^{1,2},
В.А. Заикин¹, Е.С. Пономарева¹,
В.И. Фисинин³, И.А. Егоров³,
Т.А. Егорова³, В.А. Манукян³,
Т.Н. Ленкова³, О.Н. Дегтярева³,
М.С. Тищенко³, Е.С. Демидова³,
Л.М. Кашпоров³, В.Е. Пашченко³

¹ООО «Биотроф+», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, Сергиев Посад, Московская обл., Россия

✉ deniz@biotrof.ru

Поступила в редакцию: 16.06.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Йылдырым Е.А., Ильина Л.А., Лаптев Г.Ю., Филиппова В.А., Тюрина Д.Г., Соколова К.А., Заикин В.А., Пономарева Е.С., Фисинин В.И., Егоров И.А., Егорова Т.А., Манукян В.А., Ленкова Т.Н., Дегтярева О.Н., Тищенко М.С., Демидова Е.С., Кашпоров Л.М., Пашченко В.Е.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-81-90

Elena A. Yildirim^{1,2} ✉, Larisa A. Ilina^{1,2},
George Yu. Laptev¹,
Valentina A. Filippova^{1,2},
Daria G. Tyurina¹, Ksenia A. Sokolova^{1,2},
Vasily A. Zaikin¹,
Ekaterina S. Ponomareva¹,
Vladimir I. Fisinin³, Ivan A. Egorov³,
Tatiana A. Egorova³,
Vardges A. Manukyan³,
Tatiana N. Lenkova³, Olga N. Degtyareva³,
Maria S. Tishenkova³,
Ekaterina S. Demidova³,
Lev M. Kashporov³,
Viktoria E. Pashchenko³

¹"Biotrof+" Ltd, Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Saint-Petersburg, Russia

³Federal Scientific Center "All-Russian Research and Technological Poultry Institute", Sergiev Posad, Moscow region, Russia

✉ deniz@biotrof.ru

Received by the editorial office: 16.06.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Yildirim E.A., Ilina L.A., Laptev G.Yu., Filippova V.A., Tyurina D.G., Sokolova K.A., Zaikin V.A., Ponomareva E.S., Fisinin V.I., Egorov I.A., Egorova T.A., Manukyan V.A., Lenkova T.N., Degtyareva O.N., Tishenkova M.S., Demidova E.S., Kashporov L.M., Pashchenko V.E.

L-карнитин-индуцированные изменения в профиле экспрессии ключевых генов у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» с учетом половых различий

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Исследование влияния L-карнитина на продуктивность и экспрессию генов цыплят-бройлеров с учетом половых различий актуально для оптимизации кормления и повышения эффективности производства.

Цель исследования — изучение влияния L-карнитина в различных дозировках на экспрессию ключевых генов у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9».

Методы. Были сформированы группы: I (контрольная) получала основной рацион (ОР), II (опытная) — ОР + L-карнитин в дозировке 30 г/т корма, III (опытная) — ОР + L-карнитин в дозировке 60 г/т корма, IV (опытная) — ОР + L-карнитин в дозировке 90 г/т корма.

Результаты. Добавление в корм 60–90 г/т L-карнитина (III и IV опытные группы) увеличивало прирост живой массы петушков (на 115 г и 119 г соответственно) по сравнению с контрольной группой (I) ($p \leq 0,05$). Аналогичные данные были получены для курочек. У петушков в III группе экспрессия *AvBD9* была повышена в 54,4 раза ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем, а в IV группе экспрессия *AvBD10* увеличилась в 10,3 раза ($p \leq 0,05$). У курочек L-карнитин ингибировал экспрессию *AvBD9* (снижение в 7 раз для II группы, $p \leq 0,05$) и *AvBD10* (снижение в 5,7 раза для II группы, $p \leq 0,05$). Повышалась экспрессия *IL6* (в 2,3 раза в III группе и 1,9 раза в IV группе, $p \leq 0,05$) и *IL8L2* (максимально в 3,3 раза во II группе, $p \leq 0,05$). L-карнитин оказывает комплексное воздействие на молекулярные процессы в слепых отростках, однако эти эффекты могут отличаться в зависимости от пола птицы.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, L-карнитин, экспрессия ключевых генов, кросс «Смена 9», количественная ПЦР с обратной транскрипцией

Для цитирования: Йылдырым Е.А. и др. L-карнитин-индуцированные изменения в профиле экспрессии ключевых генов у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» с учетом половых различий. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 81–90.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-81-90>

L-carnitine-induced changes in the expression profile of key genes in broiler chickens of the “Smena 9” cross, taking into account sex differences

ABSTRACT

Relevance. The study of the effect of L-carnitine on the productivity and gene expression of broiler chickens, taking into account sex differences, is relevant for optimizing feeding and increasing production efficiency.

The aim of the study was to study the effect of L-carnitine in various dosages on the expression of key genes in broiler chickens of the “Smena 9” cross.

Methods. Groups were formed: I (control) received the basic ration (RR), II (experimental) — RR + L-carnitine at a dosage of 30 g/t of feed, III (experimental) — RR + L-carnitine at a dosage of 60 g/t of feed, IV (experimental) — RR + L-carnitine in a dosage of 90 g / ton of feed.

Results. The addition of 60–90 g/t of L-carnitine to the feed (experimental groups III and IV) increased the live weight gain of roosters (by 115 g and 119 g, respectively) compared with the control group (I) ($p < 0.05$). Similar data was obtained for chickens. In the cockerels in group III, the expression of *AvBD9* was increased by 54.4 times ($p < 0.05$) compared with the control, and in group IV, the expression of *AvBD10* increased by 10.3 times ($p < 0.05$). In chickens, L-carnitine inhibited the expression of *AvBD9* (a decrease of 7 times for group II, $p < 0.05$) and *AvBD10* (a decrease of 5.7 times for group II, $p < 0.05$). The expression of *IL6* increased (2.3-fold in group III and 1.9-fold in group IV, $p < 0.05$) and *IL8L2* (maximum 3.3-fold in group II, $p < 0.05$). L-carnitine has a complex effect on molecular processes in the blind processes, however, these effects may differ depending on the sex of the bird.

Key words: broiler chickens, L-carnitine, expression of key genes, cross “Smena 9”, quantitative PCR with reverse transcription

For citation: Yildirim E.A. *et al.* L-carnitine-induced changes in the expression profile of key genes in broiler chickens of the “Smena 9” cross, taking into account sex differences. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 81–90 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-81-90>

Введение/Introduction

В условиях современных вызовов, связанных с необходимостью обеспечения продовольственной безопасности и импортозамещения, особое значение приобретают развитие отечественного птицеводства и создание конкурентоспособных кроссов цыплят-бройлеров. Кросс цыплят-бройлеров «Смена 9» — это перспективная разработка российских селекционеров, демонстрирующая хорошие показатели продуктивности и адаптивности к местным условиям выращивания [1], что делает его привлекательной альтернативой импортным аналогам.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности выращивания скота и птицы является оптимизация рациона питания с включением биологически активных веществ, например L-карнитина. L-карнитин, играющий ключевую роль в транспорте жирных кислот в митохондриях для бета-окисления [2], широко используется в рационах цыплят-бройлеров с целью улучшения роста, повышения качества мяса и снижения жировых отложений. Исследования подтверждают положительное влияние L-карнитина на различные аспекты метаболизма цыплят-бройлеров, включая липидный обмен, энергетический баланс и антиоксидантную защиту [3].

Однако, несмотря на обширные данные о физиологических эффектах L-карнитина, молекулярные механизмы его действия, особенно в контексте генетической регуляции, изучены недостаточно полно. На зарубежных кроссах цыплят-бройлеров отмечали влияние данного биологически активного вещества на транскрипционный профили. Так, V. Mohammadi и соавт. [4] изучали влияние добавления L-карнитина в рацион петухов кросса Ross 308 на экспрессию отдельных генов, связанных с апоптозом, а также на уровни мРНК десатураз и элонгаз в яйцах петухов.

Исследователи обнаружили, что добавление L-карнитина увеличивает экспрессию генов *Elovl5* и *Fads2*, которые участвуют в метаболизме длинноцепочечных жирных кислот. Тем не менее генетический потенциал и физиологические особенности кросса «Смена 9» могут обуславливать специфические ответы на включение L-карнитина в рацион. Вполне возможно, что эффекты L-карнитина могут зависеть от кросса, возраста птицы, дозы и других факторов.

Известно, что состав рациона оказывает значительное влияние на экспрессию генов у цыплят-бройлеров, регулируя процессы роста, развития и метаболизма [5]. Влияние биологически активных добавок на транскрипционный профиль генов открывает новые возможности для оптимизации продуктивности и улучшения качества продукции птицеводства. В связи с этим изучение влияния L-карнитина на экспрессию ключевых генов у цыплят-бройлеров представляет собой актуальную и перспективную задачу. Кроме

того, учитывая известный половой диморфизм в росте и метаболизме цыплят-бройлеров [6], необходимо учитывать возможные различия в экспрессии генов у петушков и курочек при воздействии L-карнитина.

Предварительные исследования, проведенные авторами на курах и петухах исходных линий кросса «Смена 9» [7], показали, что использование комбикормов с пониженной (на 5%) питательностью по лизину, метионину и обменной энергии с применением сульфата лизина и гидроксиданалога метионина позволяет поддерживать продуктивность родительского стада на уровне рационов рекомендуемой питательности. В настоящее время комплексные исследования влияния L-карнитина на зоотехнические, физиологические и биохимические показатели, а также на экспрессию генов у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» при раздельном выращивании по полу и использовании комбикормов с пониженной питательностью по лизину, метионину и обменной энергии отсутствуют. Исследования в этом направлении позволят глубже понять молекулярные механизмы действия L-карнитина, оптимизировать стратегию его применения в рационах цыплят-бройлеров и повысить эффективность производства мяса птицы в условиях импортозамещения.

Цели данного исследования — изучение влияния L-карнитина в различных дозировках на экспрессию ключевых генов, регулирующих антиоксидантную защиту (*SOD1*), иммунный ответ (*AvBD1*, *AvBD2*, *AvBD9*, *AvBD10*), воспаление и апоптоз (*IL6*, *IL8L2*, *PTGS2*, *Casp6*), мясную продуктивность (*SGLT2*) и барьерную функцию эпителия желудочно-кишечного тракта (*MUC2*) у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» при использовании рационов с пониженной (на 5%) питательностью по лизину, метионину и обменной энергии, а также выявление возможных половых различий в характере этих изменений.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В 2024 году на базе Селекционно-генетического центра «Загорское ЭПХ» (Московская обл., Россия) были проведены два эксперимента с цыплятами-бройлерами кросса «Смена 9».

Эксперименты выполняли раздельно для петушков (опыт 1-й) и курочек (опыт 2-й) с 1-го по 35-й день жизни. Птицу содержали в клеточных батареях типа Big Dutchman (Big Dutchman AG, Германия) — по 36 голов в каждой экспериментальной группе. Формирование групп осуществляли по принципу аналогов с учетом возраста, живой массы и клинического состояния птицы (табл. 1).

Условия содержания птицы (плотность посадки, световой режим, температурный режим, влажность, фронт кормления и поения) соответствовали зоотехническим нормативам для кросса «Смена 9»¹ и были идентичными для всех экспериментальных групп.

Таблица 1. Схема формирования экспериментальных групп с дифференциацией по полу

Table 1. Scheme of formation of experimental groups with differentiation by gender

Группа	Особенности кормления
I (контрольная)	ОР с дефицитом лизина (в форме сульфата) на 5%, метионина (в форме жидкого гидроксианалога) на 5% и обменной энергии на 5% от рекомендуемых значений для данного кросса
II (опытная)	ОР + L-карнитин в дозировке 30 г/т корма
III (опытная)	ОР + L-карнитин в дозировке 60 г/т корма
IV (опытная)	ОР + L-карнитин в дозировке 90 г/т корма

Кормление осуществляли полнорационными рассыпными комбикормами с дефицитом лизина (в форме сульфата) на 5%, метионина (в форме жидкого гидроксианалога) на 5% и обменной энергии на 5% от рекомендуемых значений для данного кросса. Рационы были унифицированы для петушков и курочек. Применяли схему кормления по периодам: с 1-го по 14-й день — комбикорм «Старт»; с 15-го по 21-й день — комбикорм «Рост»; с 22-го по 35-й день — комбикорм «Финиш».

Состав и питательная ценность использованных комбикормов представлены в таблице 2.

Уровни добавки в комбикорма всех биологически активных веществ обеспечивали за счет использования витаминно-минерального премикса, рекомендованного для кросса¹.

Эксперимент проводили с соблюдением принципов, изложенных в Европейской конвенции по охране позвоночных животных², применяемых в экспериментальных и других научных целях (ETS № 123, Страсбург, 1986)².

Условия содержания птиц соответствовали зоотехническим требованиям, предъявляемым к выращиванию цыплят-бройлеров.

Плотность посадки, параметры освещения, температурный и влажностный режим, а также доступность корма и воды обеспечивались согласно рекомендациям, разработанным для кросса «Смена 9», на протяжении всего периода выращивания³.

В ходе эксперимента осуществляли контроль за сохранностью поголовья и динамикой живой массы цыплят-бройлеров. Индивидуальное взвешивание всех птиц в каждой группе проводили регулярно.

По завершении эксперимента проводили эвтаназию птиц методом декапитации с последующим отбором образцов тканей слепой кишки для анализа экспрессии генов.

Оценку уровня мРНК проводили с использованием полимеразной цепной реакции в реальном времени с обратной транскрипцией (qRT-PCR).

Таблица 2. Структура и питательность комбикормов для цыплят-бройлеров

Table 2. Structure and nutritional value of compound feeds for broiler chickens

Компонент	Период выращивания (дни жизни)		
	старт (0–14)	рост (15–21)	финиш (22–35)
Кукуруза, СП 8,5%	15,00	15,00	15,00
Пшеница, СП 11,5%	43,99	42,31	45,90
Соевый шрот, СП 44%	21,58	17,82	14,67
Соя полножирная, СП 34%	10,00	10,00	10,00
Мука рыбная, СП 67%	4,00	2,00	–
Жмых подсолнечника, СП 33,5%	–	5,55	6,25
Масло соевое	1,74	3,49	4,07
Известняк, Са 36%	1,02	1,23	1,16
Монокальцийфосфат	1,16	1,17	1,28
Сульфат лизина	0,27	0,26	0,39
Родимет	0,30	0,23	0,24
Треонин	0,10	0,05	0,10
Соль	0,26	0,31	0,36
Премикс витаминно-минеральный	0,5	0,5	0,05
Холин-хлорид	0,08	0,08	0,08
Итого	100	100	100
В 100 г комбикорма содержится, %			
Обменная энергия, ккал	295	305	310
Обменная энергия, МДж/кг	12,36	12,78	12,99
Сырой протеин	22,35	20,97	19,04
Сырая клетчатка	3,77	4,50	4,50
Кальций	1,00	1,00	0,90
Фосфор общий	0,76	1,74	0,71
Фосфор усвояемый	0,45	0,42	0,40
Натрий	0,16	0,16	0,16
Хлор	0,22	0,23	0,25
Лизин усвояемый	1,17	1,04	0,97
Метионин усвояемый	0,58	0,51	0,48
Мет.+ цист. усвояемый	0,88	0,80	0,76
Треонин усвояемый	0,77	0,67	0,65
Триптофан усвояемый	0,24	0,23	0,21

Выделение тотальной РНК из тканей осуществляли с применением набора Aurum™ Total RNA Mini Kit (Bio-Rad, Hercules, США) в соответствии с протоколом производителя. Обратную транскрипцию РНК и синтез комплементарной ДНК (кДНК) проводили с использованием набора iScript™ Reverse Transcription Supermix (Bio-Rad, Hercules, США).

Для оценки экспрессии целевых генов были выбраны праймеры, последовательности которых приведены в таблице 3.

В качестве эндогенного контроля экспрессии использовали праймеры к гену ACTB, кодирующему белок бета-актин. Единица измерения экспрессии ключевых генов — количество молекул РНК (например, мРНК) в образце. Результаты были получены с использованием количественной ПЦР (qPCR).

¹Ефимов Д.Н. и др. Руководство по работе с птицей мясного кросса «Смена 9» с аутосексной материнской родительской / под ред. В.И. Фисинина и Д.Н. Ефимова. Сергиев Посад. 2021; 95.

²Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (Страсбург, 18 марта 1986 года) (электронный ресурс). — URL: <https://base.garant.ru/4090914/>

³Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы. Молекулярно-генетические методы определения микрофлоры кишечника / под общ. ред. В.И. Фисинина. Сергиев Посад: ВНИТИП. 2013.

Таблица 3. Олигонуклеотидные праймеры, использованные в qRT-PCR для оценки уровня экспрессии генов у цыплят-бройлеров кросса «Смена 9»

Table 3. Oligonucleotide primers used in qRT-PCR to assess the level of gene expression in broilers chicken of the «Smena 9» cross

Характеризуемый ген (функциональная категория)	Нуклеотидные последовательности прямого (F) и обратного (R) праймеров для количественной ПЦР в реальном времени (qRT-PCR) (5' → 3')
Гены, участвующие в антиоксидантной защите	
SOD1, супероксиддисмутаза 1	F: CGGGCCAGTAAAGGTTACTGGAA, R: TGTTGTCTCCAAATTCATGCACATG
Гены, модулирующие иммунный ответ	
AvBD1, β-дефензин 1	F: CCGTTTCTGTCAACCGTCA, R: CCTTTGCTAAATAATCCCTTC
AvBD2, β-дефензин 2	F: GCACTCCAGGTTTCTCCA, R: GGCGTCCGACTTTGATTA
AvBD9, птичий β-дефензин 9	F: AACACCGTCAGGCATCTTCACA, R: CGTCTCTCTGGCTGTAAGCTGGA
AvBD10, птичий β-дефензин 9	F: GCTCTTCGCTGTTCTCCTCT, R: CCAGATGATGGTGAAGGTG
AvBD11, птичий β-дефензин 11	F: AGTCTGCAATTCGTTAGAGGCG, R: GGATGTGGTTTCCAAGGGTTTA
Гены, ассоциированные с воспалением и апоптозом	
IL6, интерлейкин 6	F: AGGACGAGATGTGCAAGAAGTTC, R: TTGGGCAGGTTGAGGTTGTT
IL8L2 (IL8), интерлейкин 8	F: GGAAGAGAGGTGTGCTTGGA, R: TAACATGAGGCACCGATGTG
PTGS2, простагландин-эндопероксидсинтаза	F: TCGAGATCACACTTGATTGACA, R: TTTGTGCCTTGTGGGTCAG
Casp6, каспаза 6	F: CAGAGGAGACAAGTGCCAGA, R: CCAGGAGCCGTTTACAGTTT
Ген, связанный с мясной продуктивностью	
SGLT2, натрий-глюкозного котранспортер 2-го типа	F: ACCAAGTACTGCAAGGCGAA, R: TGAGGGTTCTCTTCTGGCT
Ген, детерминирующий барьерную функцию эпителия ЖКТ	
MUC2, муцин 2	F: CTGGCTCCTGTGGCTCCTC, R: AGCTGCATGACTGGAGACAACCTG

Данные об уровнях экспрессии генов были нормализованы относительно контрольных генов и представлены в виде относительных уровней экспрессии относительно контрольной группы. Результаты представлены в относительных единицах (у. е.), отражающих кратность отклонения от уровня экспрессии соответствующего гена в контрольной группе. Снижение экспрессии гена в опытной группе по сравнению с контролем обозначалось отрицательными значениями, увеличение — положительными.

Амплификацию проводили на детектирующем амплификаторе ДТлайт («ДНК-Технология», Россия) с использованием реакционной смеси SsoAdvanced™ Universal SYBR® Green Supermix (Bio-Rad, США). Программа амплификации включала: начальную денатурацию при 95 °C в течение 5 мин.; 40 циклов, состоящих из денатурации при 95 °C (30 сек.), отжига при 60 °C (30 сек.) и элонгации при 70 °C (30 сек.).

Для математической и статистической обработки полученных данных применяли многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) в Microsoft Excel XP/2003 и среде R-Studio v. 1.1.453 (<https://rstudio.com>, США). Сравнение средних значений

проводили с помощью критерия Тьюки (Honestly Significant Difference, HSD), реализованного функцией TukeyHSD в пакете R Stats Package (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На рисунке 1 отражена динамика прироста живой массы петушков и курочек кросса «Смена 9» в зависимости от дозировки L-карнитина в комбикорме.

Введение 60–90 г/т корма L-карнитина в рацион положительно сказалось на продуктивности птицы. Так, к 35-суточному возрасту петушки, получавшие L-карнитин в составе комбикорма (III и IV опытные группы), демонстрировали статистически значимо ($p \leq 0,05$) больший прирост живой массы (115 г и 119 г соответственно) по сравнению с I (контрольной) группой. Аналогичная тенденция наблюдалась и у курочек: в III и IV опытных группах прирост живой массы составил 104 г и 109 г соответственно, что также статистически значимо ($p \leq 0,05$) отличалось от контрольных показателей.

Ранее Rabie M.H. и соавт. [8] обнаружили, что добавление в рацион цыплят-бройлеров L-карнитина в количестве от 20 до 60 мг/кг улучшило показатели роста, тогда как Murali P. и соавт. [3] показано, что добавление L-карнитина в рацион цыплят-бройлеров не повлияло на показатели роста, усвоение питательных веществ и азотный баланс у цыплят-бройлеров.

На рисунке 2 продемонстрировано влияние различных дозировок L-карнитина в составе комбикорма на экспрессию ключевых генов у петушков кросса «Смена 9».

Аналогичные данные для курочек представлены на рисунке 3.

Стоит отметить, что слепые отростки у птиц играют важную роль в пищеварении и иммунной системе, представляя собой место активной ферментации и взаимодействия с микробиотой [9].

Рис. 1. Живая масса петушков и курочек кросса «Смена 9» в 35 суток под влиянием различных дозировок L-карнитина: I–IV — опытные группы, * при $p \leq 0,05$ при сравнении опытных групп с I (контрольной) согласно критерию Стьюдента

Fig. 1. Live weight of roosters and chickens of the «Shift 9» cross at 35 days under the influence of various dosages of L-carnitine: I–IV — experimental groups, * at $p < 0.05$ when comparing experimental groups with I (control) according to the Student's criterion

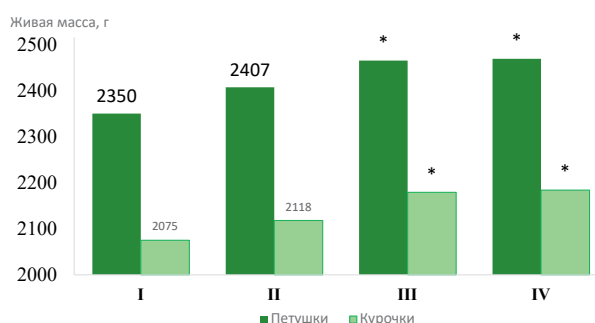
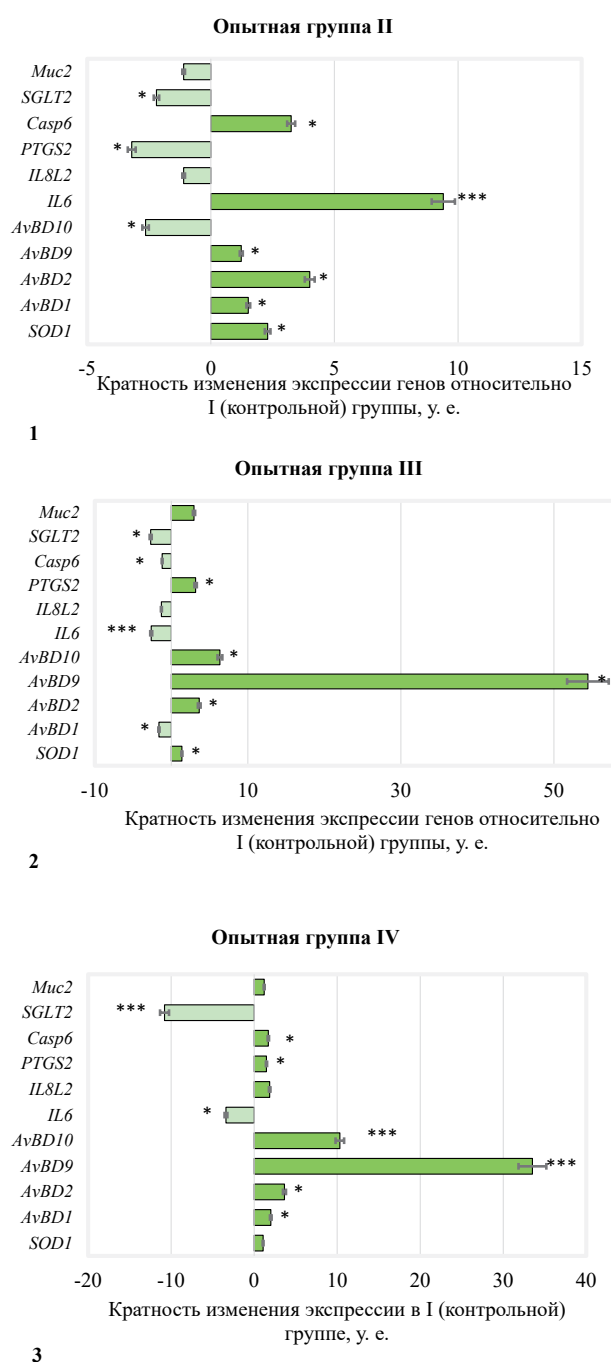


Рис. 2. Влияние различных дозировок L-карнитина в комбикорме на экспрессию ключевых генов у петушков кросса «Смена 9»: 1 — во II опытной группе, 2 — в III опытной группе, 3 — в IV опытной группе; по оси абсцисс отображены изменения в уровне экспрессии генов в II–IV опытных группах по сравнению с I (контрольной) группой, уровень экспрессии генов в которой условно принят за единицу. Отрицательные значения (выделены черным цветом) указывают на снижение экспрессии гена в опытных группах, а положительные значения (выделены зеленым цветом) — на увеличение. Значения отражают кратность отклонения от уровня экспрессии в контрольной группе

Fig. 2. The effect of different dosages of L-carnitine in compound feed on the expression of key genes in the “Smena 9” cross cockerels: 1 — in the II experimental group, 2 — in the III experimental group, 3 — in the IV experimental group; the abscissa axis shows changes in the level of gene expression in the II–IV experimental groups compared with the I (control) group, the level of gene expression in which is conventionally assumed to be one. Negative values (highlighted in black) indicate a decrease in gene expression in the experimental groups, while positive values (highlighted in green) indicate an increase. The values reflect the frequency of deviation from the expression level in the control group



Отмечено повышение экспрессии генов анти-микробных пептидов, таких как *AvBD9* и *AvBD10*, особенно в группах с более высокой дозировкой L-карнитина, что указывает на усиление врожденного иммунитета в слепых отростках [10]. Так, в III группе (60 г/т L-карнитина) экспрессия *AvBD9* была повышена в 54,4 раза ($p \leq 0,05$) по сравнению с I (контрольной), а в IV группе (90 г/т L-карнитина) экспрессия *AvBD10* увеличилась в 10,3 раза ($p \leq 0,05$) по сравнению с I (контрольной).

Белки AvBD (авиан бета-дефензины) являются важными компонентами иммунной защиты слизистой оболочки кишечника, обладая широким спектром антимикробной активности против бактерий, вирусов и грибов [11], поэтому увеличение их экспрессии может способствовать поддержанию здорового баланса микробиоты, снижению риска инфекций и улучшению усвоения питательных веществ. С учетом того что слепые отростки являются местом активной ферментации клетчатки, усиление иммунной защиты в этой области может быть особенно важным для поддержания здоровья кишечника [12]. С другой стороны, ингибирование мРНК гена *IL6* (интерлейкина-6) в III и IV группах в 2,6 и 3,4 раза ($p \leq 0,05$) может свидетельствовать о смягчении воспалительных процессов, вызванных, например, дисбактериозом или другими негативными факторами [13].

Интерлейкин-6 является плейотропным цитокином, который может как стимулировать нормальный иммунный ответ, так и участвовать в развитии хронического воспаления. Ранее было показано, что вызванная L-карнитином активация гена *CPT1* предотвращала воспаление за счет снижения воспалительных цитокинов, таких как TNF- α , в сыворотке и печени [15]. Более высокий уровень мРНК *IL6* в настоящем исследовании во II группе (в 9,4 раза выше по сравнению с контролем, $p \leq 0,05$), возможно, связан с дозозависимым эффектом L-карнитина.

Изменения в экспрессии гена *SOD1*, кодирующего супероксиддисмутазу, также заслуживают внимания. Белок SOD1 является ключевым антиоксидантным ферментом, защищающим клетки от повреждения свободными радикалами [14]. Во II группе (30 г/т L-карнитина) экспрессия *SOD1* была усилена в 2,3 раза ($p \leq 0,05$) по сравнению с контрольной группой, в III группе (60 г/т L-карнитина) — в 1,4 раза ($p \leq 0,05$) по сравнению с контрольной группой, а в IV группе — неизменна. Эта тенденция указывает на то, что эффект L-карнитина на экспрессию *SOD1*, по-видимому, наиболее выражен при более низкой дозировке (30 г/т) и снижался с увеличением дозировки. Это может свидетельствовать о дозозависимом, но нелинейном эффекте L-карнитина на антиоксидантную систему в слепых отростках. В целом повышение экспрессии *SOD1* может указывать на то, что L-карнитин стимулирует антиоксидантную защиту в слепых отростках, снижая окислительный стресс и защищая клетки от повреждений,

вызванных воспалением или другими факторами.

Ранее было показано на млекопитающих, что добавление L-карнитина влияет на удаление свободных радикалов и защищает клетки от окислительного стресса [15] за счет повышения активности ферментов каталазы GPX и SOD.

Кроме того, в IV группе на поголовье петушков экспрессия SGLT2 снизилась до 0,09 ($p \leq 0,05$) от уровня контроля. Снижение экспрессии гена SGLT2, кодирующего натрий-глюкозный котранспортер 2, может иметь последствия для метаболизма глюкозы в слепых отростках [16]. Белок SGLT2 участвует в реабсорбции глюкозы в почках, но его роль в кишечнике менее изучена. Снижение экспрессии гена SGLT2 может влиять на доступность глюкозы для микробиоты слепых отростков, что в свою очередь может изменять состав и активность микробиоты.

Экспрессия гена Muc2, кодирующего муцин 2, основного компонента слизистой оболочки кишечника [17], также претерпевала изменения под влиянием L-карнитина. Индукция экспрессии Muc2 в III группе в 3 раза ($p \leq 0,05$) может указывать на усиление защитных свойств слизистой оболочки слепых отростков, что может способствовать поддержанию здоровой среды для микробиоты и улучшению усвоения питательных веществ.

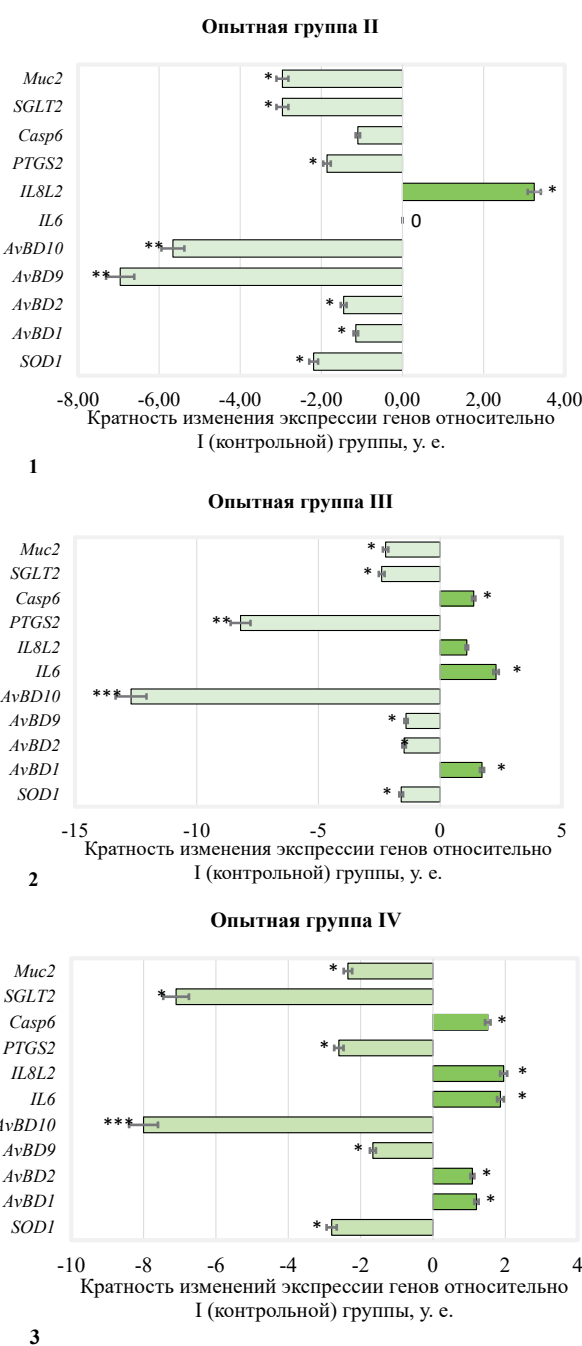
В отличие от петушков, где L-карнитин в высоких дозировках значительно повышал экспрессию AvBD9 и AvBD10, у курочек наблюдалась иная картина (рис. 3). Например, во II группе наблюдалось значительное снижение экспрессии AvBD9 (в 7 раз ниже относительно уровня контроля, $p \leq 0,05$) и AvBD10 (в 5,7 раза ниже от уровня контроля, $p \leq 0,05$). В III и IV группах экспрессия AvBD9 и AvBD10 была сниженной ($p \leq 0,05$). Это может свидетельствовать о различном влиянии L-карнитина на иммунный ответ в слепых отростках у петушков и курочек, возможно, механизмы регуляции экспрессии AvBD генов зависят от пола или гормонального статуса птицы.

В III (в 2,3 раза, $p \leq 0,05$) и IV (в 1,9 раза, $p \leq 0,05$) группах экспрессия IL6 повышалась так же, как и во II группе, в опыте на петушках. Экспрессия IL8L2 повышалась во всех опытных группах курочек по сравнению с контролем, достигая максимальных значений во II группе (в 3,3 раза, $p \leq 0,05$), что может свидетельствовать об активации иммунных клеток и привлечении их в слепые отростки. Отмечено ингибирование экспрессии гена-маркера воспаления PTGS2 (COX-2), особенно в III группе (в 8,2 раза ниже по сравнению с контролем, $p \leq 0,05$), что демонстрирует возможность противовоспалительного эффекта L-карнитина в слепых отростках [18].

Экспрессия гена SOD1, кодирующего супероксиддисмутазу, у курочек была снижена во всех опытных группах по сравнению с контрольной с наиболее выраженным снижением во II группе ($p \leq 0,05$), что отличается от результатов,

Рис. 3. Влияние различных дозировок L-карнитина в комбикорме на экспрессию ключевых генов у курочек кросса «Смена 9»: 1 — во II опытной группе, 2 — в III опытной группе, 3 — в IV опытной группе; по оси абсцисс отображены изменения в уровне экспрессии генов во II–IV опытных группах по сравнению с I (контрольной) группой, уровень экспрессии генов в которой условно принят за единицу. Отрицательные значения (выделены черным цветом) указывают на снижение экспрессии гена в опытных группах, а положительные значения (выделены зеленым цветом) — на увеличение. Значения отражают кратность отклонения от уровня экспрессии в контрольной группе

Fig. 3. The effect of different dosages of L-carnitine in compound feed on the expression of key genes in chickens of the "Smena 9" cross: 1 — in the II experimental group, 2 — in the III experimental group, 3 — in the IV experimental group; the abscissa axis shows changes in the level of gene expression in the II–IV experimental groups compared with the I (control) group, the level of gene expression in which is conventionally assumed to be one. Negative values (highlighted in black) indicate a decrease in gene expression in the experimental groups, while positive values (highlighted in green) indicate an increase. The values reflect the frequency of deviation from the expression level in the control group



полученных на петушках, где экспрессия SOD1 повышалась во II группе. Данный факт может говорить о разном ответе антиоксидантной системы на L-карнитин у петушков и курочек. Экспрессия гена SGLT2, кодирующего натрий-глюкозный котранспортер 2, у курочек была снижена во всех опытных группах, как и у петушков, с наиболее выраженным снижением в IV группе (снижение в 7,1 раза от уровня контроля, $p \leq 0,05$).

Связь между изменениями в экспрессии генов и увеличением живой массы у курочек в III и IV группах может быть опосредована различными механизмами. Например, изменения в экспрессии SGLT2, как уже было сказано, могут влиять на состав микробиоты хيمуса кишечника и эффективность усвоения питательных веществ, что может отражаться на живой массе птицы. Например, снижение экспрессии SGLT2 может привести к изменению доступности глюкозы для микробиоты, что в свою очередь может способствовать росту определенных видов бактерий, способствующих усвоению питательных веществ и увеличению живой массы.

Таким образом, результаты, полученные на курочках, отличаются от результатов, полученных на петушках, что указывает на гендерные различия в ответе на L-карнитин. На взгляд авторов, влияние половых гормонов на экспрессию генов — это одна из наиболее вероятных причин наблюдаемой разницы. Эстрогены у курочек и андрогены у петушков, по всей видимости, оказывают различное воздействие на регуляцию генов, в том числе изученных авторами. Известно, что эстрогены могут влиять на активность иммунных клеток и модуляцию воспалительных процессов, что в свою очередь способно изменять экспрессию AvBD9/10 [19]. Андрогены, с другой стороны, могут оказывать иное влияние на иммунную систему, смещая баланс в сторону определенных иммунных реакций [20]. Более того, половые гормоны напрямую или косвенно воздействуют на метаболические процессы, влияя на усвоение питательных веществ [21] и, как следствие, на экспрессию генов, связанных с транспортом глюкозы (SGLT2) и антиоксидантной защитой (SOD1).

Разница в экспрессии генов может являться следствием метаболических различий между курочками и петушками, которые обусловлены разной скоростью роста и потребностью в энергии. Поэтому влияние L-карнитина на метаболизм липидов и углеводов может проявляться по-разному в зависимости от пола. У петушков, например, повышение экспрессии SOD1 может быть связано с более активным метаболизмом и повышенным уровнем оксидативного стресса, в то время как у курочек снижение экспрессии SOD1 может

отражать иные механизмы регуляции антиоксидантной защиты.

Наконец, состав микробиоты кишечника, на который могут влиять как половые гормоны, так и диетические факторы (включая L-карнитин), играет важную роль в модуляции экспрессии генов хозяина [22]. Различия в микробиоте кишечника курочек и петушков могут влиять на доступность питательных веществ, продукцию короткоцепочечных жирных кислот и модуляцию иммунной системы.

Выводы/Conclusions

Введение L-карнитина в комбикорм с пониженным уровнем обменной энергии, лизина и метионина положительно влияет на продуктивность петушков и курочек кросса «Смена 9», однако эффект и механизмы воздействия различаются в зависимости от дозировки и пола птицы. Добавление L-карнитина в количестве 60–90 г/т корма увеличивает прирост живой массы у петушков и курочек к 35-суточному возрасту, в отличие от дозировки 30 г/т корма. У петушков L-карнитин, вероятно, усиливает врожденный иммунитет, повышая экспрессию антимикробных пептидов (AvBD9, AvBD10) и антиоксидантную защиту (SOD1), а также снижает воспалительные процессы (ингибирование IL6). Снижение экспрессии SGLT2 может влиять на метаболизм глюкозы и микробиоту, а индукция экспрессии Muc2 усиливает защитные свойства слизистой оболочки кишечника. В отличие от петушков, у курочек наблюдается снижение экспрессии антимикробных пептидов AvBD9 и AvBD10 под воздействием L-карнитина, что указывает на половые различия в регуляции иммунного ответа в слепых отростках.

В целом результаты показывают, что L-карнитин оказывает комплексное воздействие на физиологические процессы в слепых отростках, включая иммунитет, антиоксидантную защиту и метаболизм глюкозы, однако эти эффекты могут отличаться в зависимости от пола птицы и дозировки L-карнитина, подчеркивая необходимость дальнейших исследований для оптимизации дозровок L-карнитина и учета половых различий при разработке рационов для птицы.

На основании полученных данных можно предположить, что включение L-карнитина в комбикорма цыплят-бройлеров, особенно в рационах с пониженным уровнем обменной энергии, лизина и метионина, может способствовать компенсации негативных эффектов, связанных с дефицитом этих питательных веществ. Однако для подтверждения данной гипотезы необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение взаимодействия L-карнитина с компонентами рациона и их соотношением.

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 поддержаны грантом РНФ № 22-66-00061 «Экспрессия генов продуктивности и резистентности кур нового отечественного кросса «Смена 9» и ее влияние на иммунитет, особенности реализации генетического потенциала продуктивности при разном энергоаминокислотном питании».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фисинин В.И. и др. Использование L-карнитина в комбикормах для цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» при раздельном по полу выращивании. *Птицеводство*. 2025; 74(3): 35–42. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2025-74-3-35-42>
2. Longo N., Frigeni M., Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Cell Research*. 2016; 1863(10): 2422–2435. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2016.01.023>
3. Murali P., George S.K., Ally K., Dipu M.T. Effect of L-carnitine supplementation on growth performance, nutrient utilization, and nitrogen balance of broilers fed with animal fat. *Veterinary World*. 2015; 8(4): 482–486. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2015.482-486>
4. Mohammadi V., Sharifi S.D., Sharafi M., Mohammadi-Sangcheshmeh A., Abedheydari E., Alizadeh A. Dietary L-carnitine affects the expression of genes involved in apoptosis and fatty acid metabolism in rooster testes. *Andrologia*. 2020; 52(11): e13876. <https://doi.org/10.1111/and.13876>
5. El-Katcha M.I. et al. Optimising Growth, Immunity, and Gene Expression in Broiler Chickens Through Dietary Threonine Levels and Oil Inclusion. *Veterinary Medicine and Science*. 2024; 10(6): e70046. <https://doi.org/10.1002/vms3.70046>
6. Müsse J., Louton H., Spindler B., Stracke J. Sexual Dimorphism in Bone Quality and Performance of Conventional Broilers at Different Growth Phases. *Agriculture*. 2022; 12(8): 1109. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081109>
7. Фисинин В.И. и др. Комбикорма с пониженным уровнем обменной энергии, лизина и метионина при использовании разных источников этих аминокислот для мясных петухов и кур кросса «Смена 9». *Птицеводство*. 2023; 72(10): 58–65. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-10-58-65>
8. Rabie M.H., Szilágyi M., Gippert T., Votisky E., Gerendai D. Influence of Dietary L-Carnitine on Performance and Carcass Quality of Broiler Chickens. *Acta Biologica Hungarica*. 1997; 48(2): 241–252. <https://doi.org/10.1007/BF03543193>
9. Deryabin D. et al. Broiler Chicken Cecal Microbiome and Poultry Farming Productivity: A Meta-Analysis. *Microorganisms*. 2024; 12(4): 747. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040747>
10. Hong Y.H., Song W., Lee S.H., Lillehoj H.S. Differential gene expression profiles of β -defensins in the crop, intestine, and spleen using a necrotic enteritis model in 2 commercial broiler chicken lines. *Poultry Science*. 2012; 91(5): 1081–1088. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01948>
11. Sugiarto H., Yu P.-L. Avian antimicrobial peptides: the defense role of beta-defensins. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2004; 323(3): 721–727. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.08.162>
12. Dittoe D.K., Olson E.G., Ricke S.C. Impact of the gastrointestinal microbiome and fermentation metabolites on broiler performance. *Poultry Science*. 2022; 101(5): 101786. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101786>
13. Aliyu M. et al. Interleukin-6 cytokine: An overview of the immune regulation, immune dysregulation, and therapeutic. *International Immunopharmacology*. 2022; 111: 109130. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.109130>
14. Ishikawa H. et al. L-Carnitine Prevents Progression of Non-Alcoholic Steatohepatitis in a Mouse Model with Upregulation of Mitochondrial Pathway. *PLoS ONE*. 2014; 9(7): e100627. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100627>
15. Tousson E., Hafez E., Zaki S., Gad A. The cardioprotective effects of L-carnitine on rat cardiac injury, apoptosis, and oxidative stress caused by amethopterin. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016; 23(20): 20600–20608. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7220-1>
16. Hiraizumi M. et al. Transport and inhibition mechanism of the human SGLT2–MAP17 glucose transporter. *Nature Structural & Molecular Biology*. 2024; 31: 159–169. <https://doi.org/10.1038/s41594-023-01134-0>
17. Liu Y., Yu X., Zhao J., Zhang H., Zhai Q., Chen W. The role of MUC2 mucin in intestinal homeostasis and the impact of dietary components on MUC2 expression. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020; 164: 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.191>

FUNDING

The studies were supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-66-00061 «Expression of Genes for Productivity and Resistance in Chickens of the New Domestic Cross “Smena 9” and Its Effect on Immunity, and the Realization of the Genetic Potential for Productivity under Different Energy-Amino Acid Nutritional Regimes.»

REFERENCES

1. Fisinin V.I. et al. Supplementation of low-density diets for “Smena-9” broilers reared sex-separately with L-carnitine. *Ptitsevodstvo*. 2025; 74(3): 35–42 (in Russian). <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2025-74-3-35-42>
2. Longo N., Frigeni M., Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Cell Research*. 2016; 1863(10): 2422–2435. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2016.01.023>
3. Murali P., George S.K., Ally K., Dipu M.T. Effect of L-carnitine supplementation on growth performance, nutrient utilization, and nitrogen balance of broilers fed with animal fat. *Veterinary World*. 2015; 8(4): 482–486. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2015.482-486>
4. Mohammadi V., Sharifi S.D., Sharafi M., Mohammadi-Sangcheshmeh A., Abedheydari E., Alizadeh A. Dietary L-carnitine affects the expression of genes involved in apoptosis and fatty acid metabolism in rooster testes. *Andrologia*. 2020; 52(11): e13876. <https://doi.org/10.1111/and.13876>
5. El-Katcha M.I. et al. Optimising Growth, Immunity, and Gene Expression in Broiler Chickens Through Dietary Threonine Levels and Oil Inclusion. *Veterinary Medicine and Science*. 2024; 10(6): e70046. <https://doi.org/10.1002/vms3.70046>
6. Müsse J., Louton H., Spindler B., Stracke J. Sexual Dimorphism in Bone Quality and Performance of Conventional Broilers at Different Growth Phases. *Agriculture*. 2022; 12(8): 1109. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081109>
7. Fisinin V.I. et al. Effects of compound feeds with different sources of lysine and methionine and lowered levels of these amino acids and metabolizable energy on the reproductive performance in male and female broiler breeders of cross “Smena 9”. *Ptitsevodstvo*. 2023; 72(10): 58–65 (in Russian). <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-10-58-65>
8. Rabie M.H., Szilágyi M., Gippert T., Votisky E., Gerendai D. Influence of Dietary L-Carnitine on Performance and Carcass Quality of Broiler Chickens. *Acta Biologica Hungarica*. 1997; 48(2): 241–252. <https://doi.org/10.1007/BF03543193>
9. Deryabin D. et al. Broiler Chicken Cecal Microbiome and Poultry Farming Productivity: A Meta-Analysis. *Microorganisms*. 2024; 12(4): 747. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040747>
10. Hong Y.H., Song W., Lee S.H., Lillehoj H.S. Differential gene expression profiles of β -defensins in the crop, intestine, and spleen using a necrotic enteritis model in 2 commercial broiler chicken lines. *Poultry Science*. 2012; 91(5): 1081–1088. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01948>
11. Sugiarto H., Yu P.-L. Avian antimicrobial peptides: the defense role of beta-defensins. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2004; 323(3): 721–727. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.08.162>
12. Dittoe D.K., Olson E.G., Ricke S.C. Impact of the gastrointestinal microbiome and fermentation metabolites on broiler performance. *Poultry Science*. 2022; 101(5): 101786. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101786>
13. Aliyu M. et al. Interleukin-6 cytokine: An overview of the immune regulation, immune dysregulation, and therapeutic. *International Immunopharmacology*. 2022; 111: 109130. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.109130>
14. Ishikawa H. et al. L-Carnitine Prevents Progression of Non-Alcoholic Steatohepatitis in a Mouse Model with Upregulation of Mitochondrial Pathway. *PLoS ONE*. 2014; 9(7): e100627. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100627>
15. Tousson E., Hafez E., Zaki S., Gad A. The cardioprotective effects of L-carnitine on rat cardiac injury, apoptosis, and oxidative stress caused by amethopterin. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016; 23(20): 20600–20608. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7220-1>
16. Hiraizumi M. et al. Transport and inhibition mechanism of the human SGLT2–MAP17 glucose transporter. *Nature Structural & Molecular Biology*. 2024; 31: 159–169. <https://doi.org/10.1038/s41594-023-01134-0>
17. Liu Y., Yu X., Zhao J., Zhang H., Zhai Q., Chen W. The role of MUC2 mucin in intestinal homeostasis and the impact of dietary components on MUC2 expression. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020; 164: 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.191>

18. Ma S.L. *et al.* Association of prostaglandin-endoperoxide synthase 2 (PTGS2) polymorphisms and Alzheimer's disease in Chinese. *Neurobiology of Aging*. 2008; 29(6): 856–860. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2006.12.011>
19. Harding A.T., Heaton N.S The Impact of Estrogens and Their Receptors on Immunity and Inflammation during Infection. *Cancers*. 2022; 14(4): 909. <https://doi.org/10.3390/cancers14040909>
20. Ben-Batalla I., Vargas-Delgado M.E., von Amsberg G., Janning M., Loges S. Influence of Androgens on Immunity to Self and Foreign: Effects on Immunity and Cancer. *Frontiers in Immunology*. 2020; 11: 1184. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01184>
21. Xega V., Liu J.-L. Beyond reproduction: unraveling the impact of sex hormones on cardiometabolic health. *Medical Review*. 2024; 4(4): 284–300. <https://doi.org/10.1515/mr-2024-0012>
22. Qi X., Yun C., Pang Y., Qiao J. The impact of the gut microbiota on the reproductive and metabolic endocrine system. *Gut Microbes*. 2021; 13(1): 1894070. <https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1894070>

ОБ АВТОРАХ

Елена Александровна Йылдырым^{1,2}

- доктор биологических наук, главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории¹
 - доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства²
- deniz@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>

Лариса Александровна Ильина^{1,2}

- доктор биологических наук, начальник молекулярно-генетической лаборатории¹
 - доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства²
- ilina@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2789-4844>

Георгий Юрьевич Лаптев¹

- доктор биологических наук, директор
laptev@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8795-6659>

Валентина Анатольевна Филиппова^{1,2}

- биотехнолог¹;
 - старший преподаватель кафедры крупного животноводства²
- filippova@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>

Дарья Георгиевна Тюрина¹

- кандидат экономических наук, заместитель директора по финансам
tiurina@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9001-2432>

Ксения Андреевна Соколова^{1,2}

- биотехнолог¹;
 - ассистент кафедры крупного животноводства²
- ksenya.k.a@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

Василий Александрович Заикин¹

- биотехнолог
dfcx@biotrof.ru

Екатерина Сергеевна Пономарева¹

- биотехнолог
kate@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4336-8273>

Владимир Иванович Фисинин³

- доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, научный руководитель
olga@vnitip.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0081-6336>

Иван Афанасьевич Егоров³

- доктор биологических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного направления «Питание птицы»
<https://orcid.org/0000-0001-9122-9553>

18. Ma S.L. *et al.* Association of prostaglandin-endoperoxide synthase 2 (PTGS2) polymorphisms and Alzheimer's disease in Chinese. *Neurobiology of Aging*. 2008; 29(6): 856–860. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2006.12.011>

19. Harding A.T., Heaton N.S The Impact of Estrogens and Their Receptors on Immunity and Inflammation during Infection. *Cancers*. 2022; 14(4): 909. <https://doi.org/10.3390/cancers14040909>

20. Ben-Batalla I., Vargas-Delgado M.E., von Amsberg G., Janning M., Loges S. Influence of Androgens on Immunity to Self and Foreign: Effects on Immunity and Cancer. *Frontiers in Immunology*. 2020; 11: 1184. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01184>

21. Xega V., Liu J.-L. Beyond reproduction: unraveling the impact of sex hormones on cardiometabolic health. *Medical Review*. 2024; 4(4): 284–300. <https://doi.org/10.1515/mr-2024-0012>

22. Qi X., Yun C., Pang Y., Qiao J. The impact of the gut microbiota on the reproductive and metabolic endocrine system. *Gut Microbes*. 2021; 13(1): 1894070. <https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1894070>

ABOUT THE AUTHORS

Elena Alexandrovna Yildirim^{1,2}

- Doctor of Biological Sciences, Chief Biotechnologist of the Molecular Genetics Laboratory¹
 - Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large-scale Animal Husbandry²
- deniz@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>

Larisa Alexandrovna Ilyina^{1,2}

- Doctor of Biological Sciences, Head of the Molecular Genetics Laboratory¹
 - Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large-scale Animal Husbandry²
- ilina@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2789-4844>

George Yurievich Laptev¹

- Doctor of Biological Sciences, Director
laptev@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8795-6659>

Valentina Anatolyevna Filippova^{1,2}

- Biotechnologist¹;
 - Senior Lecturer of the Department of Large-scale Animal Husbandry²
- filippova@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>

Daria Georgievna Tyurina¹

- Candidate of Economic Sciences, Deputy Director of Finance
tiurina@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9001-2432>

Ksenya Andreevna Sokolova^{1,2}

- Biotechnologist¹;
 - Assistant of the Department of Large Animal Husbandry²
- ksenya.k.a@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

Vasily Alexandrovich Zaikin¹

- Biotechnologist
dfcx@biotrof.ru

Ekaterina Sergeevna Ponomareva¹

- Biotechnologist
kate@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4336-8273>

Vladimir Ivanovich Fisinin³

- Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Supervisor
olga@vnitip.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0081-6336>

Ivan Afanasievich Egorov³

- Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Scientific Field "Poultry Nutrition"
<https://orcid.org/0000-0001-9122-9553>

Татьяна Анатольевна Егорова³

доктор сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник
eta164@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5102-2248>

Вардгес Агавардович Манукян³

доктор сельскохозяйственных наук, главный научный
сотрудник, заведующий отделом питания птицы
manukyan@vnitip.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4564-4427>

Татьяна Николаевна Ленкова³

доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
главный научный сотрудник, главный ученый секретарь
dissovet@vnitip.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8391-5000>

Ольга Николаевна Дегтярева³

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник
fncvnitip@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7243-7381>

Мария Сергеевна Тищенко³

младший научный сотрудник
tishenkova.m@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2911-5640>

Екатерина Сергеевна Демидова³

младший научный сотрудник
mixalysha@mail.ru

Лев Михайлович Кашпоров³

специалист
lev-lud2@live.ru
<https://orcid.org/0009-0000-5100-4843>

Виктория Евгеньевна Пашченко³

специалист
viktoriia_pashchenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7484-196X>

¹ ООО «Биотроф+»,
бульвар Загребский, 19, корп. 1, кв. 13,
Санкт-Петербург, 192284, Россия

² Санкт-Петербургский государственный аграрный
университет,
Петербургское шоссе, 2, Пушкин, Санкт-Петербург,
196601, Россия

³ Федеральный научный центр «Всероссийский научно-
исследовательский и технологический институт
птицеводства»,
ул. Птицеградская, 10, Сергиев Посад, Московская обл.,
141311, Россия

Tatiana Anatolyevna Egorova³

Doctor of Agricultural Sciences,
Leading Researcher
eta164@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5102-2248>

Vardges Agavardovich Manukyan³

Doctor of Agricultural Sciences,
Chief Researcher, Head of the Poultry Nutrition Department
manukyan@vnitip.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4564-4427>

Tatiana Nikolaevna Lenkova³

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Chief Researcher, Chief Scientific Secretary
dissovet@vnitip.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8391-5000>

Olga Nikolaevna Degtyareva³

Candidate of Agricultural Sciences, Researcher
fncvnitip@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7243-7381>

Maria Sergeevna Tishenkova³

Junior Researcher
tishenkova.m@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2911-5640>

Ekaterina Sergeevna Demidova³

Junior Researcher
mixalysha@mail.ru

Lev Mikhailovich Kashporov³

Specialist
lev-lud2@live.ru
<https://orcid.org/0009-0000-5100-4843>

Victoria Evgenievna Pashchenko³

Specialist
viktoriia_pashchenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7484-196X>

¹“Biotrof”+ Ltd,
19 Zagrebky Boulevard, 1 building, 13 apartment,
St. Petersburg, 192284, Russia

² Saint Petersburg State Agrarian University,
2 Peterburgskoye Shosse, Pushkin, Saint Petersburg, 196601,
Russia

³ Federal Scientific Center «All-Russian Research
and Technological Poultry Institute»,

10 Ptitsegradskaya Str., Sergiev Posad, Moscow Region,
141311, Russia

УДК 638.5:559.27

Научный обзор



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-91-101

В.В. Гречкина^{1,2}О.В. Кван^{1,3} ✉Е.В. Шейда^{1,3}М.А. Десятков^{1,2}Н.В. Соболева²

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

²Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

³Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

✉ kwan111@yandex.ru

Поступила в редакцию: 12.05.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Гречкина В.В., Кван О.В., Шейда Е.В., Десятков М.А., Соболева Н.В.

Эндогенные потери минеральных веществ в организме животных и факторы, влияющие на их доступность (обзор)

РЕЗЮМЕ

Эндогенные потери питательных веществ у сельскохозяйственных животных играют ключевую роль в регуляции обмена веществ и поддержании гомеостаза в организме животных. Для их снижения необходимо проводить нутритивную поддержку — вводить в корма минеральные вещества, необходимые для восстановления обмена веществ у животных. Цели исследования — провести анализ публикаций научных исследований по состоянию микронутриентной обеспеченности рационов, их роли для сельскохозяйственных животных и выявить факторы, влияющие на эндогенные потери эссенциальных элементов из организма с 2010 по 2025 год.

При поиске источников литературы использовали традиционный и смешанный методы, а также автоматизированный поиск. Знание механизмов эндогенных потерь и их биологической значимости позволит не только повысить продуктивность животных, но и улучшить экологическую устойчивость сельского хозяйства. Современные методы кормления, использование ферментов, минеральных добавок и правильная селекция позволят значительно уменьшить потери питательных веществ, что является важным шагом на пути к более эффективному и устойчивому животноводству. Применение минеральных добавок с улучшенной биодоступностью и степенью усвоения даст возможность сократить концентрацию микроэлементов, включаемых в корм бройлерам. Уменьшение содержания минералов в корме приведет к удешевлению рационов и сокращению выброса химических элементов в агроэкосистему. Таким образом, поддержание стабильного уровня минералов в теле животных на производстве возможно лишь через обеспечение питательными веществами каждой клетки. Это достигается либо повышением ежедневного потребления этих элементов, либо применением форм с улучшенным усвоением, таких как нано- и металлорганические соединения.

Ключевые слова: сельскохозяйственные животные, эссенциальные элементы, обмен веществ, кормление, наночастицы, эндогенные потери, новые принципы, минеральное питание, усвояемость

Для цитирования: Гречкина В.В., Кван О.В., Шейда Е.В., Десятков М.А., Соболева Н.В. Эндогенные потери минеральных веществ в организме животных и факторы, влияющие на их доступность (обзор). *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 91–101. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-91-101>

Endogenous losses of minerals in the animal body and factors affecting their availability (review)

ABSTRACT

Endogenous nutrient losses in farm animals play a key role in regulating metabolism and maintaining homeostasis in the animal body. To reduce them, it is necessary to carry out nutritional support — to introduce minerals into the feed, which are necessary to restore the metabolism of animals.

The purpose of the study is to analyze the publications of scientific research on the state of micronutrient supply of diets, their role for farm animals and to identify factors affecting the endogenous loss of essential elements from the body from 2010 to 2025.

When searching for literature sources, traditional and mixed methods were used, as well as automated search. Knowledge of the mechanisms of endogenous losses and their biological significance will not only increase animal productivity, but also improve the environmental sustainability of agriculture. Modern feeding methods, the use of enzymes, mineral additives and proper breeding will significantly reduce nutrient losses, which is an important step towards more efficient and sustainable animal husbandry. Thus, maintaining a stable level of minerals in the body of animals is possible only by providing nutrients to each cell. This is achieved either by increasing the daily intake of these elements or by using forms with improved absorption, such as nano- and organometallic compounds.

Keywords: farm animals, essential elements, metabolism, feeding, nanoparticles, endogenous losses, new principles, selective management

For citation: Grechkina V.V., Kvan O.V., Sheida E.V., Desyatkov M.A., Soboleva N.V. New principles of optimizing the nutrition of farm animals based on selective management of endogenous losses of essential elements (review). *Agrarian science*. 2025; 399(10): 91–101 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-91-101>

Review



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-91-101

Viktoria V. Grechkina^{1,2}Olga V. Kvan^{1,3} ✉Elena V. Sheida^{1,3}Mikhail A. Desyatkov^{1,2}Natalia V. Soboleva²

¹Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

²Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

³Orenburg State University, Orenburg, Russia

✉ kwan111@yandex.ru

Received by the editorial office: 12.05.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Grechkina V.V., Kvan O.V., Sheida E.V., Desyatkov M.A., Soboleva N.V.

Введение/Introduction

Эндогенные потери питательных веществ у сельскохозяйственных животных — ключевая тема в области животноводства, поскольку она напрямую связана с эффективностью кормления, продуктивностью и здоровьем животных. Эти потери происходят в процессе метаболизма и выведения веществ, которые не могут быть использованы организмом. Понимание механизмов эндогенных потерь и их биологической значимости позволяет оптимизировать кормовые рационы и улучшать управление здоровьем животных, что способствует повышению экономической эффективности сельского хозяйства [1].

Они играют важную роль в регуляции обмена веществ и поддержании гомеостаза в организме животных: с одной стороны, способствуют удалению избыточных или неподдающихся усвоению веществ, предотвращая их накопление и возможное токсическое воздействие, с другой — высокая степень потерь может свидетельствовать о нарушениях в обмене веществ или недостаточности кормов [2].

Значительные потери азота через мочу могут быть следствием дисбаланса в рационе, особенно при недостатке углеводов в кормах, что приводит к избыточному выделению белка. Это может не только снижать продуктивность животных, но и отрицательно сказываться на экологии, поскольку избыточное количество азота в экскретах может приводить к загрязнению почвы и водоемов [3].

Для животных, выращиваемых для получения молока, мяса и яиц, высокая степень эндогенных потерь может означать неэффективное использование питательных веществ, что ведет к снижению роста, ухудшению репродуктивных функций и снижению качества продукции. Проблема особенно актуальна для высокопродуктивных животных, таких как молочные коровы и мясные породы свиней, которые требуют оптимального баланса между потреблением и усвоением питательных веществ [4].

Для минимизации потерь питательных веществ и повышения продуктивности животных необходимо учитывать механизмы их при разработке кормовых рационов и управлении метаболическими процессами [5].

Значимость вклада эндогенного сегмента минерального обмена в формирование продуктивности животных определяется количеством эндогенных минеральных веществ, выделяемых в пищеварительный тракт, нередко на порядок, превышающий экзогенный компонент. Влияние отдельных кормовых добавок, микрофлоры и пищеварительного тракта на продуктивность и минеральный обмен у животных всё еще остается неизученной проблемой [6].

Внедрение новых методов кормления, таких как использование кормовых добавок, ферментов, микро- и макроэлементов, может значительно снизить потери углеводов и белков через кишечник и мочу, улучшив усвояемость питательных веществ.

Цели исследования — провести анализ публикаций научных исследований по состоянию микронутриентной обеспеченности рационов, их роли для сельскохозяйственных животных и выявить факторы, влияющие на эндогенные потери эссенциальных элементов из организма с 2010 по 2025 год.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Поиск и анализ литературы проводили с использованием интернет-ресурсов: РИНЦ (<https://www.elibrary.ru>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>), <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>). При поиске источников литературы использовали разные подходы, среди них — традиционный и смешанный метод, а также автоматизированный поиск. Предпочтение было отдано источникам с 2010 по 2025 год — по ключевым словам: сельскохозяйственные животные, эссенциальные элементы, обмен веществ, кормление, наночастицы, эндогенные потери, новые принципы, минеральное питание, усвояемость.

Проанализированы более 60 источников литературы по микроэлементам Fe, Cu, Zn, Mn, Co.

Для обзора отбирали материалы, подготовленные отечественными и зарубежными учеными в области кормления животных, и использовали теоретические методы исследования (анализ, классификацию и обобщение).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Биологическая роль эссенциальных элементов в организме животных

Роль минералов в рационе сельскохозяйственных животных обусловлена не только их конкретным воздействием на метаболизм, биодоступностью и участием в поддержании кислотно-щелочного баланса, но и их способностью взаимодействовать с другими элементами, оказывая тем самым как положительное, так и отрицательное воздействие на здоровье животных. Различные формы взаимодействия между минеральными элементами могут оказывать существенное влияние на продуктивность и общее состояние здоровья животных [7].

В исследованиях М.Т. Сабитова (2020 г.) показано, что эффективность усвоения питательных веществ корма у жвачных напрямую зависит от функционирования рубца. При отсутствии каких-либо отклонений здоровая микрофлора рубца обеспечивается поступлением с кормом достаточного количества минералов в сбалансированном соотношении [8].

Дисбаланс макро- и микроэлементов в питании, будь то их нехватка или переизбыток, влечет за собой нарушение равновесия между питательными веществами и биологически активными компонентами, что негативно сказывается на обмене веществ. Д.М. Богданович (2020 г.) установил, что

гомеостатические параметры организма в значительной степени зависят от функционального значения микроэлементов, так как они обеспечивают организм химически активными катионами и анионами [9].

Результаты опыта Ю.Н. Арылова (2017 г.) показали, что основной приток микроэлементов в организм коров обеспечивается за счет грубых и концентрированных кормов, поэтому поддержание необходимого уровня микроэлементов в этих кормах имеет первостепенное значение. Для достижения этой цели рекомендуется использовать микроудобрения при выращивании кормовых культур для компенсации дефицита минеральных веществ, проводить уборку трав в наиболее подходящие фазы вегетации, а также строго следовать технологическим процессам при заготовке и хранении травяных кормов. В кормах микроэлементы представлены в наиболее благоприятных физиологических пропорциях относительно друг друга, а также в сочетании с витаминами, макроэлементами, белками и углеводами, что способствует их более эффективному усвоению и использованию. Такой комплексный подход позволяет существенно смягчить проблему дефицита микроэлементов в рационе коров [10].

Прежде чем детально рассматривать физиологические и биохимические свойства каждого микроэлемента, важно акцентировать внимание на том, что ключевую роль в их биологической активности играет способность к формированию биокластеров. Иными словами, они обладают возможностью создавать динамичные и стабильные биоконплексы, преимущественно входящие в состав активных центров ферментов. Именно эти биоконплексы непосредственно вовлечены в кислотно-щелочные реакции и окислительно-восстановительные процессы, протекающие в организме [11].

Для коров с высокой молочной продуктивностью рекомендуется увеличивать содержание микроэлементов в корме на 30–50%. Однако избыток микроэлементов может быть вреден. Согласно литературным источникам, для коров в период лактации токсичными считаются следующие концентрации микроэлементов в расчете на 1 кг сухого вещества корма: железо — 240 мг, медь — 115 мг, цинк — 900 мг, йод — 1000 мг, кобальт — 30 мг, селен — 5 мг [12].

Необходимо регулярно проверять концентрацию микроэлементов в кормах и рационах коров. Это требуется для создания индивидуальных премиксов, которые полностью удовлетворяют потребности животных, учитывая фактическое содержание микроэлементов в кормах. Исследования, проведенные Г.П. Воронцовым (2022 г.), показали, что целенаправленная корректировка микроэлементного питания коров увеличивает стабильность лактации на 7,4%, сокращает период между отелом и плодотворным осеменением на 14 дней и уменьшает расход корма на 1 кг

молока на 10,2%. Кроме того, такой подход способствует повышению устойчивости новорожденных телят к болезням и снижает заболеваемость коров маститом и эндометритом [13].

В исследовании М.О. Каримовой (2020 г.) было показано, что потребность животных в минеральных веществах и незаменимых аминокислотах, обусловленная физиологией, варьируется в зависимости от множества факторов, включая возраст, текущее физическое состояние, методы и условия содержания, тип рациона и уровень продуктивности [14]. Главным источником основных минералов для животных служит растительная пища. При этом состав минералов в кормах подвержен значительным колебаниям, которые определяются не только биохимическими зонами страны, но и региональными особенностями.

Н.М. Костомахин и др. (2019 г.) выявили критически важную связь между микроэлементами и работой ферментных систем в организме животных. Одно- и двухвалентные ионы металлов интегрированы в структуру ферментов, имеющих асимметричное строение, что является причиной их повышенной каталитической способности. Ряд микроэлементов, таких как медь, цинк, кобальт и марганец, в форме ионов напрямую включаются в активный центр ферментов, оказывая значительное влияние на их функциональность [15].

В современной научной литературе уделяется значительное внимание взаимосвязи между микроэлементами и работой эндокринной системы, а также активностью гормонов. Они существенно влияют на уровень естественной устойчивости организма, функционирование иммунитета и поддержание антиоксидантной защиты животных. Минералы служат важными составляющими гормональных молекул, включая инсулин, пролактин, тироксин и др. [16].

В организме животных микроэлементы содержатся в малых стабильных концентрациях, но их значение для роста и развития огромно. Cu, Fe, Mn и Zn, например, действуют в основном как катализаторы ферментативных реакций в клетках или входят в состав ферментов. Их вклад в ферментативные процессы варьируется от слабого влияния ионной силы до высокоспецифичных связей, образующих металлоферменты. Эти металлоферменты оказывают существенное воздействие на метаболизм животных (даже в минимальном количестве). Из-за этого сложно выявить подходящий биомаркер для точного определения статуса этих микроэлементов и их функций. Тем не менее стабильное соотношение каждого минерала в общей концентрации в организме животных разного возраста предполагает, что с увеличением массы тела растет лишь общее содержание микроэлементов. Нехватка этих элементов, несомненно, замедлит рост животных, а их избыток окажет отрицательное воздействие и будет выведен из организма [17].

Железо играет ключевую роль в окислительно-восстановительных процессах и переносе

электронов, необходимых для клеточного дыхания. В организме животного подавляющая часть железа имеет органическое происхождение, а лишь незначительная доля представлена свободными неорганическими ионами. Приблизительно две трети железа сконцентрировано в гемоглобине, который жизненно важен для транспортировки кислорода и регуляции клеточного дыхания. Оставшаяся часть распределена между различными белками, служащими резервуарами железа [18].

Железо необходимо для производства энергии клетками и организмом в целом, а также для метаболизма белков и поддержания здоровья, для предотвращения анемии. Предполагается, что этот пул выполняет несколько важных функций, включая обеспечение железом для синтеза железосодержащих ферментов, участие в клеточном транспорте и хранении железа, а также влияние на экспрессию или подавление железосодержащих ферментов [19].

Медь преимущественно связывается с церулоплазмином и в значительном количестве присутствует в металлоферментах, таких как цитохромоксидаза, супероксиддисмутаза, лизилоксидаза, дофамин-β-гидроксилаза и тирозиназа. Вместе с тем установлено, что недостаток меди в пищевом рационе не оказывает влияния на концентрацию церулоплазмينا, синтезируемого печенью. Этот микроэлемент играет важную роль в ряде биологических процессов, включая клеточное дыхание, функционирование сердечно-сосудистой системы, формирование костной ткани, развитие соединительной ткани, кератинизацию и пигментацию тканей, а также в процессе миелинизации спинного мозга. Медь оказывает непосредственное влияние на метаболизм железа и, как следствие, опосредованно участвует в биосинтезе гемоглобина [20].

Цинк — критически важный микроэлемент, выполняющий в организме три фундаментальные функции: каталитическую, структурную и регуляторную. Он является составной частью более чем 300 ферментов, включая карбоангидразу, алкогольдегидрогеназу и щелочную фосфатазу, где участвует в каталитических реакциях. Входит в структуру свыше 1000 транскрипционных факторов, что указывает на влияние минерального статуса на экспрессию генов. Несмотря на эту тесную связь между микроэлементом и ферментами, прямая зависимость между снижением ферментативной активности и недостатком Zn выражена слабо. Это объясняется тем, что Zn-содержащие ферменты характеризуются исключительным сродством к иону Zn, удерживая его даже при его низкой концентрации [21].

Марганец, подобно другим эссенциальным микроэлементам, способен выступать как активатор ферментов, так и входить в состав металлоферментов, играющих роль в метаболизме белков и гликолизе. Несмотря на ограниченное число

Mn-содержащих металлоферментов, он способен активировать широкий спектр ферментов, включая гидролазы, киназы, декарбоксилазы и трансферазы. Марганец крайне необходим для нормального развития костной ткани у бройлеров, для метаболизма углеводов и липидов, обеспечения функционирования иммунной и нервной систем, а также для репродуктивной функции [22].

Факторы, влияющие на эндогенные потери минеральных веществ

Моча и кал — основные пути выведения веществ, которые не были усвоены или избыточны в организме. В частности, по данным А.М. Камировой и ее коллег (2020 г.), через мочу выделяются азотистые вещества, такие как мочевина, аммиак, а также минералы, включая калий и натрий. Избыточные органические вещества, такие как аминокислоты, могут выводиться через кал, если они не усваиваются в тонком кишечнике или не участвуют в обменных процессах организма [23].

М.Я. Курилкина и др. (2017 г.) совместно с коллегами определили, что нехватка или, напротив, переизбыток макро- и микроэлементов в кормах скота может серьезно отразиться на их здоровье и производительности, негативно влияя на репродуктивные функции коров, вызывая аномалии развития у молодняка и провоцируя различные заболевания [24].

Для поддержания высокой продуктивности необходимо обеспечивать поступление макро- и микроэлементов в организм животных в оптимальном количестве и пропорциях, строго соответствующих их физиологическим потребностям. С.С. Абрамов и др. (2017 г.) при обследовании рационов в различных хозяйствах выявили существенный недостаток ряда минеральных веществ и витаминов, что требует корректировки системы кормления в целом [25].

Исследования V.I. Fisinina *et al.* (2018) показали, что, к сожалению, во многих хозяйствах минеральному питанию коров и телят не придают должного значения, что приводит к существенным экономическим убыткам из-за снижения надоев, ухудшения качества молока, проблем с воспроизводством и высокой заболеваемости телят. Дефицит минералов чаще всего проявляется в виде проблем с костной системой (таких, как рахит, остеопороз и остеомалация), нарушениях в мышечной и нервной ткани (например, тетания, беломышечная болезнь), сбоях в кровотоке (в частности, анемия и акабальтоз), а также в нарушениях работы эндокринной системы (например, эндемический зоб) [26].

Перенасыщение организма минералами может привести к его отравлению. Значительные концентрации железа, меди, кобальта, цинка, молибдена, селена и фтора обладают токсичными свойствами. Для выявления дефицита или профицита минеральных компонентов в питании необходимо

анализировать их концентрацию в кормах и сопоставлять с уточненными стандартами потребностей животных в этих элементах. Следовательно, крайне важно регулярно отслеживать обеспеченность животных микроэлементами и своевременно реагировать на любые признаки их нехватки.

R. Prasad *et al.* (2017) установили, что даже при оптимальном соотношении энергии и белка в рационе часто наблюдается дефицит минеральных веществ и витаминов, что провоцирует возникновение различных болезней, ухудшение репродуктивной функции и снижение продуктивности. Такой дисбаланс в кормлении влечет за собой значительные финансовые потери для сельскохозяйственных предприятий. Необходимо понимать, что одного лишь анализа состава рациона недостаточно для точной оценки обеспеченности животных необходимыми минералами и витаминами [27].

Принимая во внимание факторы, обнаруженные в исследованиях Е.А. Сизовой и др. (2016 г.), оказывающие воздействие на всасывание и применение минералов и витаминов, это имеет большое значение. Важно понимать, что лишь конкретная доля макро- и микроэлементов способна абсорбироваться и трансформироваться в организме в метаболически активную форму. По этой причине было введено понятие биологической доступности (БД). В основном под биологической доступностью специалисты подразумевают эффективность абсорбции и использования минеральных веществ у животных, полученных из различных источников или при разных физиологических состояниях организма. Оптимизация рационов с учетом БД позволяет более полно удовлетворять потребности организма в макро- и микроэлементах, эффективнее использовать корма и добавки, а также проводить объективную оценку новых кормовых средств и методов подготовки кормов к употреблению [28].

Микробиота, особенно у травоядных животных, играет значительную роль в переработке и выводе питательных веществ. Например, у коров и овец ферментация углеводов и расщепление белков в рубце часто приводят к образованию летучих жирных кислот и аммиака, которые частично теряются через экскреты. Brown K. и др. (2023) провели ряд исследований на мышах, чтобы выявить, как микробиота влияет на эндогенные потери минеральных веществ [29].

Эндогенные потери могут быть связаны с изменениями в гормональном фоне. Например, стрессы или инфекции могут активировать выработку кортикостероидов, что в свою очередь повышает метаболическую активность и выведение питательных веществ. Согласно исследованиям Д.Е. Шошина и др. (2024 г.), повышение уровня кортизола и других гормонов стресса может ускорить распад жиров и белков, что приводит к их избыточной утрате через экскреты. Важно отметить, что такие потери особенно значимы в условиях

интенсивного производства, когда животные подвергаются стрессовым ситуациям, связанным с транспортировкой, сменой климата или заболеванием [30].

Факторы, влияющие на доступность минеральных веществ кормов для жвачных

Поддержание стабильной концентрации минералов в теле животных обеспечивается гомеостатическими механизмами, которые регулируют: 1) уровень абсорбции; 2) экскрецию с мочой; 3) тканевые отложения в безвредном количестве или мобилизацию резервных форм; 4) эндогенную экскрецию с калом. Эти процессы позволяют организму поддерживать минеральный баланс, несмотря на колебания в питании и метаболических потребностях. Гомеостаз минеральных веществ важен для нормального функционирования различных физиологических систем, включая нервную, мышечную и костную. Изменения в абсорбции, экскреции и тканевом распределении минералов позволяют организму адаптироваться к различным условиям и поддерживать оптимальную внутреннюю среду [31].

Добавление в рацион ферментов, таких как целлюлаза и амилаза, может улучшить переваривание клетчатки и углеводов, что уменьшает количество неусвоенных питательных веществ и их потерю через кал. Согласно работе М.Т. Капланова, Р.Р. Исякаевой, использование таких добавок у жвачных животных повышает эффективность переработки корма и снижает потери энергии [32].

P.V. Chrystal *et al.* (2020) предположили, что постоянный мониторинг экскретов животных, особенно их состава и концентрации азотистых веществ, позволяет точно регулировать состав кормов. Это помогает уменьшить потери белка и других питательных веществ. Такой подход позволяет более точно определять потребности животных в питательных веществах и избегать их избыточных потерь [33].

В последние годы набирает популярность направление по улучшению кормления животных через селекцию. Селекция на основе эффективности усвоения питательных веществ способствует созданию животных, которые могут использовать корм более эффективно, что позволяет снизить эндогенные потери и повысить общую продуктивность [34].

Если в качестве источника нерасщепляемого протеина в корме применяется барда, то использование минеральных добавок с высоким содержанием фосфора и серы не рекомендуется. Это обусловлено тем, что барда уже содержит значительные количества этих элементов. Чтобы избежать риска токсического воздействия и нежелательных финансовых затрат, следует избегать избыточного внесения этих минералов без крайней необходимости. В то же время барда характеризуется низким содержанием Са и Си. В таких ситуациях включение этих элементов в рацион

животных является оправданным и полезным для поддержания их здоровья и продуктивности [35].

В результатах исследования J. Li *et al.* (2022) отмечается, что эффективность всасывания цинка существенно падает с возрастом: у молодых телят она превышает 50%, в то время как у взрослых коров этот показатель снижается до 12%. Это объясняется тем, что микроэлементы легко вступают в реакции с анионными лигандами, образуя комплексы [36].

Схожая картина наблюдается в экспериментах D.E. Charmaine *et al.* (2021) с усвоением Cu у ягнят: если у сосунков этот показатель составляет 71%, то непосредственно перед отъемом он снижается до 47%, а через две недели после отъема — до 11%. У взрослых овец, обладающих полноценно функционирующим рубцом, доступность меди колеблется в пределах 4–8%. Считается, что возрастное снижение усвоения меди связано с активностью рубцовой микрофлоры, продуцирующей сульфиды. Эти соединения связывают медь, образуя сульфид меди и тиомолибдат меди — формы, значительно хуже усваиваемые организмом [17].

M. Molenda *et al.* (2023) определили, что когда запасы минералов, особенно Ca, P и Zn, истощаются в период беременности и лактации, то животные способны усваивать эти элементы в объеме, вдвое превышающем потребности организма в нормальном состоянии [37].

Паразитарные инвазии у овец приводят к внутренним потерям и ухудшению всасывания Ca и P, оказывая неблагоприятное воздействие на костную ткань и способствуя развитию рахита и иных патологий. Кроме того, установлено, что паразиты ухудшают усвоение меди. Инфицирование *T. circumcincta* способно нарушить метаболизм меди, что связано, в частности, с увеличением pH в сычуге. Уменьшение кислотности приводит к снижению растворимости меди и, как следствие, ухудшению ее захвата печенью [38].

У животных, испытывающих тепловой стресс, часто выявляется снижение уровня P, Na, K и Zn в сыворотке крови. Это, вероятно, связано с уменьшением потребления сухого вещества корма и, как следствие, недостаточным поступлением этих минералов. В связи с этим увеличение концентрации этих элементов в рационе может стать эффективным способом компенсации сниженного потребления сухого вещества и обеспечения достаточного количества минералов для скота [39].

В теле животных непрерывно поддерживается баланс между противоположными процессами, и даже незначительные отклонения от нормы оперативно корректируются. К примеру, поступление минералов в плазму крови сбалансировано их удалением из нее, всасывание из желудочно-кишечного тракта уравнивается внутренними потерями через этот же тракт, высвобождение минеральных веществ из костей компенсируется их включением в костную ткань, реабсорбция в почечных канальцах согласована с выведением

минералов почками вместе с мочой. Увеличенное выделение минеральных веществ у животных, потреблявших добавки из неорганических источников, объясняется повышенной концентрацией этих элементов в базовом корме. По сути, животные получали избыточное количество минералов по сравнению с их потребностями [40].

Учеными E. Kaleigh *et al.* (2021) предполагается, что органические минералы проявляют меньшую склонность к взаимодействию с другими компонентами пищи и формированию труднодоступных соединений в кишечном тракте, что благоприятствует более эффективному усвоению этих минералов. Следовательно, возможно применение органических минералов в меньших дозировках, не опасаясь ухудшения показателей роста и продуктивности, при этом снижая концентрацию минералов в экскрементах. Иными словами, высокая биодоступность органических минералов позволяет уменьшить их общее количество в рационе без ущерба для здоровья и продуктивности животных [41].

Хелатирование органических микроэлементов обеспечивает максимальную биодоступность, поскольку экранирует положительный заряд минералов. Это повышает устойчивость к изменениям pH в процессе пищеварения, снижая конкуренцию между минералами с одинаковым зарядом. В результате кишечник лучше усваивает минералы, а потери с экскрементами сокращаются [42].

Результаты A. Scherzad *et al.* (2017) показали, что Cu, Fe, Mn и Zn способны к образованию гидроксиполимеров и хорошо растворяются в кислой среде. Однако в нейтральных условиях кишечника они быстро преобразуются в нерастворимые гидроксидные соединения, выпадающие в осадок. Следовательно, абсорбция этих микроэлементов, вероятно, зависит от секреции желудочного сока в желудке. Существенное падение кислотности желудочного сока способно уменьшить концентрацию растворенных и, как следствие, биодоступных металлов в желудочном [43].

Экспериментальные исследования C.D. Espinosa и H.H. Stein (2021) установили, что введение хелатных соединений металлов, таких как Cu и Co, в рацион телят приводит к стимуляции активности церулоплазмينا, повышению уровня тиоловых соединений, сульфгидрильных групп и гамма-глобулиновой фракции протеинов в сыворотке крови. Это в свою очередь способствует увеличению скорости набора веса у молодых бычков. Вероятно, лишь небольшая доля биогенных металлов, присутствующих в корме, способна образовывать комплексы, легкоусвояемые организмом [17].

В текущих практиках животноводства и птицеводства корректировка минерального состава кормов является необходимой процедурой. Это обусловлено как прогрессом в генетическом потенциале животных, так и особенностями биогеохимических регионов, а также воздействием

компонентов корма на усвоение минералов и прочими факторами. Ионные формы химических элементов выступают в качестве источников необходимых веществ. Однако для них *in vivo* характерны такие недостатки, как ограниченная биодоступность, способность вызывать окислительный стресс и высокий уровень токсичности [44].

По этой причине перспективы применения металлотерапии вызывают неоднозначную реакцию, а особое внимание уделяется поиску менее токсичных источников эссенциальных химических элементов, среди которых перспективными считаются ультрадисперсные формы металлов [45].

Перспективным научным вектором выступает применение микроэлементов в ультрадисперсном состоянии. Исключительные характеристики делают их подходящими для создания медикаментов, вакцин, биологически активных добавок и пр. [46]. Ультрадисперсные микроэлементы улучшают взаимодействие с бактериями, способствуют разрушению клеточных оболочек, подавляют ферментативную активность и синтез ДНК.

Исследования демонстрируют, что микроэлементы в форме ультрадисперсных частиц характеризуются повышенной биодоступностью по сравнению с традиционно используемыми в кормах неорганическими соединениями, такими как оксиды, сульфаты и карбонаты [47, 48]. Более того, ультрадисперсным частицам приписывают широкий спектр свойств, включая антибактериальное, антигрибковое, противовирусное, антипротозойное и антиоксидантное действие. Благодаря этим свойствам они могут служить альтернативным решением антибиотикам, стимулируя здоровье и рост животных [49].

Е.В. Шейда и соавт. (2022 г.) установили, что дополнительное включение микроэлемента цинка в различных дозировках оказывало позитивное влияние на переваримость СВ лузги подсолнечника и течение метаболических процессов в модели рубца жвачных. Максимально эффективное использование показал опытный образец, включающий лузгу, подвергнутую механическому измельчению, плюс гидромодуль (вода), плюс обработку УЗ (20 °С, 15 мин., 27 кГц) с дополнительным внесением ультрадисперсных частиц Zn в дозировке 3,0 мг на 1 кг СВ рациона [50].

Применение ультрадисперсных частиц меди и железа, как утверждают в своей работе О.В. Кван и др. (2024 г.), оказывает влияние на состав микробного сообщества кишечника у птицы. Согласно полученным данным, ультрадисперсные частицы Fe позволяют сохранить нормальное разнообразие пищеварительной микробиоты птицы, что было выражено в том числе в уменьшении численности представителей семейства *Enterobacteriaceae*, в число которых входят представители патогенных и условно-патогенных таксонов, в то время как внесение ультрадисперсных частиц Cu способствовало повышению численности представителей данного семейства [51].

Таким образом, существуют различные подходы к снижению эндогенных потерь минеральных веществ у сельскохозяйственных животных. Но активное развитие нанотехнологий и создание веществ наноразмерного диапазона с уникальными свойствами открывают новые возможности для решения вышеуказанных проблем.

Выводы/Conclusions

Эндогенные потери питательных веществ — это неизбежный, но управляемый процесс в организме сельскохозяйственных животных. Знание механизмов этих потерь и их биологической значимости позволяет не только повысить продуктивность животных, но и улучшить экологическую устойчивость сельского хозяйства.

Современные методы кормления, использование ферментов, минеральных добавок и правильная селекция позволят значительно уменьшить потери питательных веществ, что является важным шагом на пути к более эффективному и устойчивому животноводству.

На основании литературных данных для минимизации эндогенных потерь минералов в животноводстве рекомендуется совершенствовать кормовые рационы, применять минеральные подкормки и учитывать условия содержания скота.

Дефицит минеральных элементов в питании вызывает сбои и расстройства минерального метаболизма, что негативно отражается на продуктивности и репродуктивных способностях животных.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-00111.

FUNDING

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation №. 25-16-00111.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao J., Li Z., Lyu M., Liu L., Piao X., Li D. Evaluation of available energy and total tract digestibility of acid-hydrolyzed ether extract of cottonseed oil for growing pigs by the difference and regression methods. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2017; 30(5): 712–719. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0546>

REFERENCES

1. Zhao J., Li Z., Lyu M., Liu L., Piao X., Li D. Evaluation of available energy and total tract digestibility of acid-hydrolyzed ether extract of cottonseed oil for growing pigs by the difference and regression methods. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2017; 30(5): 712–719. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0546>

2. Сидельникова В.И., Черницкий А.Е., Ретский М.И. Эндогенная интоксикация и воспаление: последовательность реакций и информативность маркеров (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2015; 50(2): 152–161.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.2.152rus>
3. Jaworski N.W., Stein H.H. Disappearance of nutrients and energy in the stomach and small intestine, cecum, and colon of pigs fed corn-soybean meal diets containing distillers dried grains with solubles, wheat middlings, or soybean hulls. *Journal of Animal Science*. 2017; 95(2): 727–739.
<https://doi.org/10.2527/jas.2016.0752>
4. Lyu Z.Q. *et al.* Adaptation duration for net energy determination of high fiber diets in growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 2018; 241: 15–26.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.04.008>
5. Araújo C.S.S. *et al.* Different dietary trace mineral sources for broiler breeders and their progenies. *Poultry Science*. 2019; 98(10): 4716–4721.
<https://doi.org/10.3382/ps/pez182>
6. Кван О.В. Эндогенные потери веществ: оптимизация микронутриентной обеспеченности рационов сельскохозяйственных животных (обзор). *Животноводство и кормопроизводство*. 2023; 106(4): 148–163.
<https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
7. Гамко Л.Н., Гулаков А.Н., Новикова Е.В., Рязанов А.А. Влияние природных минеральных добавок на продуктивность молодняка крупного рогатого скота. *Таврический научный обозреватель*. 2016; (5–2): 106–110.
<https://www.elibrary.ru/wckxlv>
8. Сабитов М.Т., Фархутдинова А.Р., Фархутдинов И.М., Маликова М.Г. Экономическая эффективность скармливания комплексной минерально-витаминной кормовой добавки «Надежда» в составе рациона телят. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2020; (1): 106–110.
<https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-53-1-106-110>
9. Богданович Д.М., Разумовский Н.П. Природный микробный комплекс в кормлении молодняка крупного рогатого скота. *Инновационное развитие аграрно-пищевых технологий. Материалы Международной научно-практической конференции*. М.: Сфера. 2020; 22–26.
<https://www.elibrary.ru/bmqjai>
10. Арылов Ю.Н., Убушаев Б.С., Мороз Н.Н. Влияние концентрации минеральных веществ в рационе на использование питательных веществ жвачными животными. *Аграрная наука*. 2017; (11–12): 50–52.
<https://www.elibrary.ru/qimnjv>
11. Jiao L. *et al.* Preparation, characterization, antimicrobial and cytotoxicity studies of copper/zinc-loaded montmorillonite. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2017; 8: 27.
<https://doi.org/10.1186/s40104-017-0156-6>
12. Marques R.S. *et al.* Effects of organic or inorganic cobalt, copper, manganese, and zinc supplementation to late-gestating beef cows on productive and physiological responses of the offspring. *Journal of Animal Science*. 2016; 94(3): 1215–1226.
<https://doi.org/10.2527/jas.2015-0036>
13. Воронцов Г.П., Антонов В.Н. Влияние микроэлементного статуса на воспроизводительную функцию у крупного рогатого скота. *StudNet*. 2022; 5(2): 956–971.
<https://www.elibrary.ru/tmhfih>
14. Каримова М.О., Иргашев Т.А., Байгенов Ф.Н., Косилов В.И., Ребезов М.Б. Метаболизм незаменимых аминокислот в организме телят под влиянием кормовой добавки. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020; (4): 302–306.
<https://www.elibrary.ru/iuijpa>
15. Костомахин Н.М., Иванова А.С. Влияние биоплексов цинка и меди на морфологические и биохимические показатели крови и молочную продуктивность коров. *Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство*. 2019; (6): 23–28.
<https://www.elibrary.ru/azxynl>
16. Разумовский Н.П. Как нормализовать рубцовое пищеварение у коров. *Наше сельское хозяйство*. 2020; (2): 22–29.
<https://www.elibrary.ru/lealvy>
17. Espinosa C.D., Stein H.H. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 13.
<https://doi.org/10.1186/s40104-020-00533-3>
18. Ebbing M.A. *et al.* An investigation on iron sources fed to broiler breeder hens and the corresponding color of laid eggshells on the performance of the resulting progeny. *Journal of Applied Poultry Research*. 2019; 28(1): 184–193.
<https://doi.org/10.3382/japr/pfy064>
19. Byrne L., Murphy R.A. Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review. *Animals*. 2022; 12(15): 1981.
<https://doi.org/10.3390/ani12151981>
2. Sidelnikova V.I., Chernitsky A.E., Retsky M.I. Endogenous intoxication and inflammation: reaction sequence and informativity of the markers (review). *Agricultural Biology*. 2015; 50(2): 152–161.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.2.152eng>
3. Jaworski N.W., Stein H.H. Disappearance of nutrients and energy in the stomach and small intestine, cecum, and colon of pigs fed corn-soybean meal diets containing distillers dried grains with solubles, wheat middlings, or soybean hulls. *Journal of Animal Science*. 2017; 95(2): 727–739.
<https://doi.org/10.2527/jas.2016.0752>
4. Lyu Z.Q. *et al.* Adaptation duration for net energy determination of high fiber diets in growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 2018; 241: 15–26.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.04.008>
5. Araújo C.S.S. *et al.* Different dietary trace mineral sources for broiler breeders and their progenies. *Poultry Science*. 2019; 98(10): 4716–4721.
<https://doi.org/10.3382/ps/pez182>
6. Kvan O.V. Endogenous losses of substances: optimization of micronutrient supply of farm animal diets (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023; 106(4): 148–163 (in Russian).
<https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
7. Gamko L.N., Gulakov A.N., Novikova E.V., Ryazhnov A.A. Influence of natural mineral additives on productivity of young cattle. *Tavricheskiy nauchnyy obozrevatel*. 2016; (5–2): 106–110 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/wckxlv>
8. Sabitov M.T., Farkhutdinova A.R., Farkhutdinov I.M., Malikova M.G. Economic efficiency of complex mineral and vitamin feed supplement «Nadezhda» in the diet of calves. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2020; (1): 106–110 (in Russian).
<https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-53-1-106-110>
9. Bogdanovich D.M., Razumovsky N.P. Natural microbial complex in feeding young cattle. *Innovative development of agro-food technologies. Proceedings of the International scientific and practical conference*. Moscow: Sfera. 2020; 22–26 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/bmqjai>
10. Arylov Yu.N., Ubushaev B.S., Moroz N.N. The influence of the concentration of minerals in the feeding regime on nutrient utilization by ruminants. *Agrarian science*. 2017; (11–12): 50–52 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/qimnjv>
11. Jiao L. *et al.* Preparation, characterization, antimicrobial and cytotoxicity studies of copper/zinc-loaded montmorillonite. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2017; 8: 27.
<https://doi.org/10.1186/s40104-017-0156-6>
12. Marques R.S. *et al.* Effects of organic or inorganic cobalt, copper, manganese, and zinc supplementation to late-gestating beef cows on productive and physiological responses of the offspring. *Journal of Animal Science*. 2016; 94(3): 1215–1226.
<https://doi.org/10.2527/jas.2015-0036>
13. Vorontsov G.P., Antonov V.N. Trace element status influence on reproductive function in cattle. *StudNet*. 2022; 5(2): 956–971 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/tmhfih>
14. Karimova M.O., Irgashev T.A., Baygenov F.N., Kosilov V.I., Rebezov M.B. Metabolism of essential amino acids in the calf body under the influence of the fodder additive. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020; (4): 302–306 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/iuijpa>
15. Kostomakhin N.M., Ivanova A.S. The influence of bioplexes of zinc and copper on morphological and biochemical blood parameters and milk productivity of cows. *Feeding of agricultural animals and feed production*. 2019; (6): 23–28 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/azxynl>
16. Razumovsky N.P. How to normalize rumen digestion in cows. *Nashe sel'skoye khozyaystvo*. 2020; (2): 22–29 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/lealvy>
17. Espinosa C.D., Stein H.H. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 13.
<https://doi.org/10.1186/s40104-020-00533-3>
18. Ebbing M.A. *et al.* An investigation on iron sources fed to broiler breeder hens and the corresponding color of laid eggshells on the performance of the resulting progeny. *Journal of Applied Poultry Research*. 2019; 28(1): 184–193.
<https://doi.org/10.3382/japr/pfy064>
19. Byrne L., Murphy R.A. Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review. *Animals*. 2022; 12(15): 1981.
<https://doi.org/10.3390/ani12151981>

20. Sai Kumar B.A.A. Hormonal Regulation of Metabolism, Water, and Minerals. Das P.K., Sejian V., Mukherjee J., Banerjee D. (eds.). Textbook of Veterinary Physiology. Singapore: Springer. 2023; 391–415. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9410-4_16
21. De Grande A. *et al.* Dietary zinc source impacts intestinal morphology and oxidative stress in young broilers. *Poultry Science*. 2020; 99(1): 441–453. <https://doi.org/10.3382/ps/pez525>
22. Lv G. *et al.* Effects of Different Trace Elements and Levels on Nutrients and Energy Utilization, Antioxidant Capacity, and Mineral Deposition of Broiler Chickens. *Agriculture*. 2023; 13(7): 1369. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071369>
23. Каримова А.М., Сизова Е.А. Использование азота и обменной энергии у полигастрических животных при скормливании в составе рациона микроэлементов в ультрадисперсной форме. *Сборник научных трудов КНЦЗВ*. 2022; 11(1): 51–54. <https://doi.org/10.48612/sbornik-2022-1-10>
24. Курилкина М.Я., Холлодиллина Т.Н., Муслюмова Д.М., Атландерова К.Н., Завьялов О.А. Воздействие высокодисперсных частиц металлов на переваримость питательных веществ и обмен энергии в организме молодняка крупного рогатого скота. *Вестник мясного скотоводства*. 2017; (4): 197–203. <https://www.elibrary.ru/kasrfi>
25. Абрамов С.С., Горидовец Е.В., Соболев Д.Т. Динамика некоторых показателей минерального и витаминного обмена у высокопродуктивных коров при лечении внутренней полиморбидной патологии. *Ученые записки учреждения образования «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины»*. 2017; 53(3): 3–6. <https://www.elibrary.ru/zqnwej>
26. Fisnin V.I., Miroshnikov S.A., Sizova E.A., Ushakov A.S., Miroshnikova E.P. Metal particles as trace-element sources: current state and future prospects. *World's Poultry Science Journal*. 2018; 74(3): 523–540. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000491>
27. Prasad R., Bhattacharyya A., Nguyen Q.D. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. *Frontiers in Microbiology*. 2017; 8: 1014. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>
28. Сизова Е.А., Королев В.Л., Макаев Ш.А., Мирошникова Е.П., Шахов В.А. Морфобиохимические показатели крови у бройлеров при коррекции рациона солями и наночастицами Cu. *Сельскохозяйственная биология*. 2016; 51(6): 903–911. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.6.903rus>
29. Brown K. *et al.* Microbiota alters the metabolome in an age- and sex- dependent manner in mice. *Nature Communications volume*. 2023; 14: 1348. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37055-1>
30. Шошин Д.Е., Ерофеев Н.Г., Сизова Е.А., Павлова М.Ю. Стресс как лимитирующий фактор в животноводстве (обзор). *Животноводство и кормопроизводство*. 2024; 107(3): 138–162. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-3-138>
31. Спешилова Н.В., Косилов В.И., Андриенко Д.А. Производственный потенциал молочного скотоводства на Южном Урале. *Вестник мясного скотоводства*. 2014; (3): 69–75. <https://www.elibrary.ru/ssyior>
32. Капланов М.Т., Исыяева Р.Р. Оптимизация технологии кормления лабораторных животных при помощи экспериментальных комбикормов. *Современные вопросы биомедицины*. 2023; 7(4): 11. https://doi.org/10.24412/2588-0500-2023_07_04_11
33. Chrystal P.V., Moss A.F., Khoddami A., Naranjo V.D., Selle P.H., Liu S.Y. Effects of reduced crude protein levels, dietary electrolyte balance, and energy density on the performance of broiler chickens offered maize-based diets with evaluations of starch, protein, and amino acid metabolism. *Poultry Science*. 2020; 99(3): 1421–1431. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.060>
34. Усманова Е.Н., Зубоченко Д.В., Остапчук П.С., Кувяда Т.А. Селекция мясного скота на повышение эффективности использования корма. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2022; (4): 270–286. <https://www.elibrary.ru/usetwo>
35. Mion B. *et al.* Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2022; 105(8): 6693–6709. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21908>
36. Li J. *et al.* Zinc Intakes and Health Outcomes: An Umbrella Review. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 798078. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.798078>
37. Molenda M., Kolmas J. The Role of Zinc in Bone Tissue Health and Regeneration — a Review. *Biological Trace Element Research*. 2023; 201(12): 5640–5651. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03631-1>
20. Sai Kumar B.A.A. Hormonal Regulation of Metabolism, Water, and Minerals. Das P.K., Sejian V., Mukherjee J., Banerjee D. (eds.). Textbook of Veterinary Physiology. Singapore: Springer. 2023; 391–415. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9410-4_16
21. De Grande A. *et al.* Dietary zinc source impacts intestinal morphology and oxidative stress in young broilers. *Poultry Science*. 2020; 99(1): 441–453. <https://doi.org/10.3382/ps/pez525>
22. Lv G. *et al.* Effects of Different Trace Elements and Levels on Nutrients and Energy Utilization, Antioxidant Capacity, and Mineral Deposition of Broiler Chickens. *Agriculture*. 2023; 13(7): 1369. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071369>
23. Karimova A.M., Sizova E.A. Use of nitrogen and metabolic energy in polygastric animals when feeding the diet with microelements in the ultradispersed form. *Collection of Scientific Papers of KRCAHVM*. 2022; 11(1): 51–54 (in Russian). <https://doi.org/10.48612/sbornik-2022-1-10>
24. Kurilkina M.Ya., Kholodilina T.N., Muslyumova D.M., Atlanderova K.N., Zavayalov O.A. The effect of finely dispersed metal particles on the digestibility of nutrients and energy exchange in the body of young cattle. *Herald of beef cattle breeding*. 2017; (4): 197–203 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/kasrfi>
25. Abramov S.S., Goridovets E.V., Sobolev D.T. Dynamics of some indices of mineral and vitamin metabolism at high-yielding cows in the treatment of polymorbid internal pathology. Scientific notes of the educational institution «Vitebsk Order “Badge of Honor” State Academy of Veterinary Medicine». 2017; 53(3): 3–6 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/zqnwej>
26. Fisnin V.I., Miroshnikov S.A., Sizova E.A., Ushakov A.S., Miroshnikova E.P. Metal particles as trace-element sources: current state and future prospects. *World's Poultry Science Journal*. 2018; 74(3): 523–540. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000491>
27. Prasad R., Bhattacharyya A., Nguyen Q.D. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. *Frontiers in Microbiology*. 2017; 8: 1014. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>
28. Sizova E.A., Korolev V.L., Makaev Sh.A., Miroshnikova E.P., Shakhov V.A. Morphological and biochemical blood parameters in broilers at correction with dietary copper salts and nanoparticles. *Agricultural Biology*. 2016; 51(6): 903–911. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.6.903eng>
29. Brown K. *et al.* Microbiota alters the metabolome in an age- and sex- dependent manner in mice. *Nature Communications volume*. 2023; 14: 1348. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37055-1>
30. Shoshin D.E., Erofeev N.G., Sizova E.A., Pavlova M.Yu. Stress as a limiting factor in animal husbandry (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024; 107(3): 138–162 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-3-138>
31. Speshilova N.V., Kosilov V.I., Andrienko D.A. Production potential of dairy cattle breeding in the Southern Urals. *Herald of beef cattle breeding*. 2014; (3): 69–75. <https://www.elibrary.ru/ssyior>
32. Kaplanov M.T., Isyakaeva R.R. Optimizing technologies of feeding laboratory animals with the experimental compound feed. *Modern Issues of Biomedicine*. 2023; 7(4): 11 (in Russian). https://doi.org/10.24412/2588-0500-2023_07_04_11
33. Chrystal P.V., Moss A.F., Khoddami A., Naranjo V.D., Selle P.H., Liu S.Y. Effects of reduced crude protein levels, dietary electrolyte balance, and energy density on the performance of broiler chickens offered maize-based diets with evaluations of starch, protein, and amino acid metabolism. *Poultry Science*. 2020; 99(3): 1421–1431. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.060>
34. Usmanova E.N., Zubochenko D.V., Ostapchuk P.S., Kuevda T.A. Breeding of beef cattle to increase the efficiency of feed intake. *Proceedings of Nizhnevolskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2022; (4): 270–286 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/usetwo>
35. Mion B. *et al.* Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2022; 105(8): 6693–6709. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21908>
36. Li J. *et al.* Zinc Intakes and Health Outcomes: An Umbrella Review. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 798078. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.798078>
37. Molenda M., Kolmas J. The Role of Zinc in Bone Tissue Health and Regeneration — a Review. *Biological Trace Element Research*. 2023; 201(12): 5640–5651. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03631-1>

38. Roeber F., Jex A.R., Gasser R.B. Impact of gastrointestinal parasitic nematodes of sheep, and the role of advanced molecular tools for exploring epidemiology and drug resistance — an Australian perspective. *Parasites & Vectors*. 2013; 6: 153. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-153>
39. Reed R.G., Raison C.L. Stress and the Immune System. Esser C. (ed.). Environmental Influences on the Immune System. Vienna: Springer. 2016; 97–126. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1890-0_5
40. Li W., Angel R., Plumstead P.W., Enting H. Effects of limestone particle size, phytate, calcium source, and phytase on standardized ileal calcium and phosphorus digestibility in broilers. *Poultry Science*. 2021; 100(2): 900–909. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.075>
41. Beane K.E. et al. Effects of dietary fibers, micronutrients, and phytonutrients on gut microbiome: a review. *Applied Biological Chemistry*. 2021; 64: 36. <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00605-6>
42. Yang Z. et al. Preliminary analysis showed country-specific gut resistome based on 1267 feces samples. *Gene*. 2016; 581(2): 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2016.01.043>
43. Scherzad A., Meyer T., Kleinsasser N., Hackenberg S. Molecular Mechanisms of Zinc Oxide Nanoparticle-Induced Genotoxicity. *Materials*. 2017; 10(12): 1427. <https://doi.org/10.3390/ma10121427>
44. Uerlings J. et al. *in vitro* prebiotic potential of agricultural by-products on intestinal fermentation, gut barrier and inflammatory status of piglets. *British Journal of Nutrition*. 2020; 123(3): 293–307. <https://doi.org/10.1017/S0007114519002873>
45. Fan X., Yang F., Nie C., Ma L., Cheng C., Haag R. Biocatalytic Nanomaterials: A New Pathway for Bacterial Disinfection. *Advanced Materials*. 2021; 33(33): 2100637. <https://doi.org/10.1002/adma.202100637>
46. Patra A., Lalhriatpui M. Progress and Prospect of Essential Mineral Nanoparticles in Poultry Nutrition and Feeding — a Review. *Biological Trace Element Research*. 2020; 197(1): 233–253. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01959-1>
47. Adegbeye M.J. et al. Nanoparticles in Equine Nutrition: Mechanism of Action and Application as Feed Additives. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2019; 78: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.04.001>
48. Bhagat S., Singh S. Nanominerals in nutrition: Recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*. 2022; 160: 111703. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111703>
49. Mohd Yusof H., Mohamad R., Zaidan U.H., Abdul Rahman N.A. Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10: 57. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0368-z>
50. Шейда Е.В., Мирошников С.А., Дускаев Г.К., Рязанов В.А., Гречкина В.В. Изменение параметров рубцового содержимого *in vitro* при использовании лузги подсолнечника и цинка в ультрадисперсной форме. *Аграрная наука*. 2022; (6): 43–47. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-43-47>
51. Кван О.В., Сизова Е.А., Вершинина И.А. Влияние ультрадисперсных частиц меди и железа на микробиоценоз кишечника цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2024; (2): 61–65. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-61-65>
38. Roeber F., Jex A.R., Gasser R.B. Impact of gastrointestinal parasitic nematodes of sheep, and the role of advanced molecular tools for exploring epidemiology and drug resistance — an Australian perspective. *Parasites & Vectors*. 2013; 6: 153. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-153>
39. Reed R.G., Raison C.L. Stress and the Immune System. Esser C. (ed.). Environmental Influences on the Immune System. Vienna: Springer. 2016; 97–126. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1890-0_5
40. Li W., Angel R., Plumstead P.W., Enting H. Effects of limestone particle size, phytate, calcium source, and phytase on standardized ileal calcium and phosphorus digestibility in broilers. *Poultry Science*. 2021; 100(2): 900–909. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.075>
41. Beane K.E. et al. Effects of dietary fibers, micronutrients, and phytonutrients on gut microbiome: a review. *Applied Biological Chemistry*. 2021; 64: 36. <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00605-6>
42. Yang Z. et al. Preliminary analysis showed country-specific gut resistome based on 1267 feces samples. *Gene*. 2016; 581(2): 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2016.01.043>
43. Scherzad A., Meyer T., Kleinsasser N., Hackenberg S. Molecular Mechanisms of Zinc Oxide Nanoparticle-Induced Genotoxicity. *Materials*. 2017; 10(12): 1427. <https://doi.org/10.3390/ma10121427>
44. Uerlings J. et al. *in vitro* prebiotic potential of agricultural by-products on intestinal fermentation, gut barrier and inflammatory status of piglets. *British Journal of Nutrition*. 2020; 123(3): 293–307. <https://doi.org/10.1017/S0007114519002873>
45. Fan X., Yang F., Nie C., Ma L., Cheng C., Haag R. Biocatalytic Nanomaterials: A New Pathway for Bacterial Disinfection. *Advanced Materials*. 2021; 33(33): 2100637. <https://doi.org/10.1002/adma.202100637>
46. Patra A., Lalhriatpui M. Progress and Prospect of Essential Mineral Nanoparticles in Poultry Nutrition and Feeding — a Review. *Biological Trace Element Research*. 2020; 197(1): 233–253. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01959-1>
47. Adegbeye M.J. et al. Nanoparticles in Equine Nutrition: Mechanism of Action and Application as Feed Additives. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2019; 78: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.04.001>
48. Bhagat S., Singh S. Nanominerals in nutrition: Recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*. 2022; 160: 111703. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111703>
49. Mohd Yusof H., Mohamad R., Zaidan U.H., Abdul Rahman N.A. Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10: 57. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0368-z>
50. Sheida E.V., Miroshnikov S.A., Duskaev G.K., Ryazanov V.A., Grechkina V.V. Changes in the parameters of ruminal digesta *in vitro* when using sunflower husk and zinc in ultrafine form. *Agrarian science*. 2022; (6): 43–47 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-43-47>
51. Kvan O.V., Sizova E.A., Vershinina I.A. Influence of ultrafine particles of copper and iron on the intestinal microbiocenosis of broiler chicken. *Agrarian science*. 2024; (2): 61–65 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-61-65>

ОБ АВТОРАХ

Виктория Владимировна Гречкина^{1,2}
кандидат биологических наук
Viktoria1985too@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1159-0531>

Елена Владимировна Шейда^{1,3}
доктор биологических наук
elena-shejda@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2586-613>

Ольга Вилориевна Кван^{1,3}
доктор биологических наук
kwan111@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Михаил Александрович Десятков^{1,2}
лаборант-исследователь
garfild5676@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-0719-2313>

ABOUT THE AUTHORS

Viktoria Vladimirovna Grechkina^{1,2}
Candidate of Biological Sciences
Viktoria1985too@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1159-0531>

Elena Vladimirovna Sheida^{1,3}
Doctor of Biological Sciences
elena-snejda@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2586-613>

Olga Vilorievna Kvan^{1,3}
Doctor of Biological Sciences
kwan111@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Mikhail Alexandrovich Desyatkov^{1,2}
Laboratory Researcher
garfild5676@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-0719-2313>

Наталья Владимировна Соболева²
кандидат сельскохозяйственных наук
natalya.soboleva12@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3688-2303>

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Россия

²Оренбургский государственный аграрный университет, ул. Челюскинцев, 18, Оренбург, 460014, Россия

³Оренбургский государственный университет, пр-т Победы, 13, Оренбург, 460018, Россия

Natalia Vladimirovna Soboleva²
Candidate of Agricultural Sciences
natalya.soboleva12@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3688-2303>

¹Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 January 9th Str., Orenburg, 460000, Russia

²Orenburg State Agrarian University, 18 Chelyuskintsev Str., Orenburg, 460014, Russia

³Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, 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 (К1, К2), 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 К1.

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

Реклама

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

✉ horarka@yandex.ru

Поступила в редакцию: 05.05.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Денискова Т.Е.

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

✉ horarka@yandex.ru

Received by the editorial office: 05.05.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Deniskova T.E.

Идентификация QTL, локализованных в регионах гомозиготности у пород овец, разводимых в России

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Лocusы количественных признаков (QTL) представляют собой геномные регионы, влияющие на экономически значимые характеристики овец. Изучение распределения QTL в геномах пород овец, разводимых в России, пересекающихся с регионами селекции, актуально для углубления понимания генетических механизмов, лежащих в основе их фенотипической вариативности.

Методы. Материалом для исследования служили полногеномные SNP-профили 10 пород овец, включающие 42230 SNP и сгенерированные с помощью биочипов OvineSNP50 BeadChip и Ovine Infinium HD BeadChip (Illumina, США). Фильтрация и контроль качества генотипирования были выполнены с использованием PLINK v1.90. В качестве индикаторов островков гомозиготности (ROH) в геноме овец были отобраны перекрывающиеся гомозиготные сегменты (ROH) с минимальной длиной 0,3 Мб, общие более чем для 50% образцов внутри породы. Анализ совпадений геномных координат островков гомозиготности с QTL был проведен с использованием базы Sheep QTLdb.

Результаты. Выявлено, что 58 уникальных QTL были локализованы внутри островков гомозиготности у 10 пород овец. Наиболее часто встречающимися показателями были живая масса (10,34%), масса жира в туше (8,62%), вес парной туши¹ (6,9%), количество молока (удой) (6,9%). В островках ROH буубэй и карагеевской породы был выявлен QTL 127011, ассоциированный с отложением жира в области хвоста. Большая группа QTL, расположенных в островках ROH, была выявлена в экспериментах по картированию QTL, ассоциированных с молочной и мясной продуктивностью, в ресурсных популяциях.

Ключевые слова: генотипирование, островки гомозиготности, ДНК-чипы, локальные породы овец, QTL, экономически значимые признаки

Для цитирования: Денискова Т.Е. Идентификация QTL, локализованных в регионах гомозиготности у пород овец, разводимых в России. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 102–109.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-102-109>

Identification of QTL localized in the runs of homozygosity in sheep breeds raised in Russia

ABSTRACT

Relevance. Quantitative trait loci (QTL) are genomic regions that influence economically significant traits of sheep. Addressing the QTL distribution in the genomes of sheep breeds raised in Russia, overlapping with selection signatures, is relevant for deepening the understanding of the genetic mechanisms underlying their phenotypic variability.

Methods. The materials for the study were genome-wide SNP profiles of ten sheep breeds that included 42,230 SNPs and were generated using the OvineSNP50 BeadChip and Ovine Infinium HD BeadChip Arrays (Illumina, USA). Genotyping quality control and filtering were performed using PLINK v1.90. Overlapping homozygous segments (ROH) with a minimum length of 0.3 MB, common to more than 50% of the samples within the breed, were selected as indicators of islands of homozygosity (ROH) in the sheep genome. Matching analysis of the genomic coordinates of the runs of homozygosity islands with QTL was performed using the Sheep QTLdb database.

Results. We found that 58 unique QTL were localized within the runs of homozygosity islands in ten sheep breeds. The most frequent traits body weight (10.34%), fat weight in carcass (8.62%), hot carcass weight (6.9%), and milk yield (6.9%).

QTL #127011 associated with fat deposition in tail was identified in the ROH islands in Buubei and Karachay breeds. A large group of QTL_s located in ROH islands were identified in experiments on QTL mapping associated with milk and meat productivity in resource populations.

Key words: genotyping, the runs of homozygosity islands, DNA chips, local sheep breeds, QTL, economically significant traits

For citation: Deniskova T.E. Identification of QTL localized in the runs of homozygosity in sheep breeds raised in Russia. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 102–109 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-102-109>

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

Введение/Introduction

Локусы количественных признаков (QTL) — это геномные регионы, ассоциированные с экономически значимыми признаками у сельскохозяйственных животных. Картирование новых QTL способствует идентификации функционального гена, лежащего в основе формирования фенотипа, а также определяет перспективы для будущих исследований в аспекте поиска геномных вариантов, влияющих на улучшение признаков [1]. Информация, полученная в результате генетического картирования, размещается в публично доступных базах данных.

Две наиболее значимые базы данных — это Animal Quantitative Trait Loci (QTL) Database (AnimalQTLdb)² и AnimalGWASAtlas³. В 2022 году была представлена обновленная версия AnimalQTLdb, содержащая сведения об известных QTL для сельскохозяйственных видов животных, включая овец, с учетом новых сборок генома для передачи данных геномной карты [2]. Согласно описанию Y. Gou *et al.* (2025), AnimalGWASAtlas объединяет общедоступные мультиомиксные данные из 140 исследований по полногеномному поиску ассоциаций (GWAS), охватывающих 471 признак у свиней, овец, крупного рогатого скота и кур [3].

Поиск QTL в геномах овец весьма актуален. Так, например, на первой хромосоме в результате GWAS, проведенного в популяции овец породы романе, был выявлен QTL, связанный с энергетическими резервами организма во время беременности и лактации. Внутри этого QTL были расположены несколько значимых SNP в гене рецептора лептина (*LEPR*) [4].

В ресурсной популяции альпийского меринуса W. Zhang *et al.* (2024) идентифицировали 46 QTL, ассоциированных с массой тела и качественными и количественными показателями шерстной продуктивности [5]. Анализируя вариацию числа копий (CNV) в полных геномах тонкорунных пород овец, C. Yuan *et al.* (2021) показали, что 1855 регионов CNV совпадали с 166 QTL, связанных с молочной продуктивностью и устойчивостью к паразитам [6].

Кроме того, до сих пор в научной литературе имеются сведения о проведении картирования QTL на основе использования микросателлитов. Например, были проведены попытки выявления QTL, связанных с молочной продуктивностью, в породе авасси в Турции с помощью 18 микросателлитов [7]. Тем не менее информация о QTL, располагающихся в регионах, испытывающих признаки отбора, у отечественных пород отсутствует.

Цели исследования — выявление количественных локусов признаков (QTL) в регионах

гомозиготности у российских пород овец и определение их ассоциации с хозяйственно ценными признаками.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Материалом для исследования служили полногеномные SNP-профили овец, включающие 42 230 SNP. Анализируемые SNP-профили были получены на основе объединения генотипов средней (50K) и высокой (600K) плотности, сгенерированные с помощью биочипов OvineSNP50 BeadChip (Illumina, США) и Ovine Infinium HD BeadChip (Illumina, США) соответственно.

В анализ были включены SNP, присутствующие в составе обоих перечисленных ДНК-чипов. SNP-генотипирование проводили на базе ЦКП «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста с 2019 по 2024 год.

Выборка овец включала представителей 10 пород:

- ✓ андийская ($n_{50K} = 17$),
- ✓ буубэй ($n_{50K} = 17$, $n_{600K} = 22$),
- ✓ волгоградская ($n_{50K} = 13$, $n_{600K} = 22$),
- ✓ забайкальская ($n_{50K} = 7$, $n_{600K} = 8$),
- ✓ карачаевская ($n_{50K} = 22$, $n_{600K} = 21$),
- ✓ кулундинская ($n_{50K} = 16$),
- ✓ кучугуровская ($n_{50K} = 16$),
- ✓ куйбышевская ($n_{50K} = 15$),
- ✓ романовская ($n_{50K} = 26$, $n_{600K} = 10$),
- ✓ русская длинношерстная ($n_{50K} = 16$, $n_{600K} = 16$).

Образцы ткани и ДНК овец были получены из УНУ «Банк генетического материала домашних и диких видов животных и птицы», поддерживаемой на базе ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста (Россия).

Фильтрация и контроль качества генотипирования были выполнены с использованием программного обеспечения PLINK v1.90⁴ (© 2025 Christopher Chang, США). С целью поиска протяженных сегментов гомозиготности использовали метод последовательных прогонов, реализованный в R-пакете detectRUNS. В ходе анализа допускали один негенотипированный и один гетерозиготный SNP.

В качестве индикаторов островков гомозиготности (RON) в геноме овец были отобраны перекрывающиеся сегменты с минимальной длиной 0,3 Мб, общие более чем для 50% образцов внутри породы. Геномные координаты островков гомозиготности состояли из номера хромосомы, нуклеотидной позиции начала и нуклеотидной позиции конца целевого геномного региона. Геномные координаты островков гомозиготности и краткая характеристика изучаемых пород представлены в таблице 1.

²<https://www.animalgenome.org/cgi-bin/QTLdb/index>

³<https://agwas.sicau.edu.cn/#/HomePage>

⁴<https://www.cog-genomics.org/plink2/>

Анализ совпадений геномных координат островков гомозиготности с локусами количественных признаков был проведен с использованием международной базы данных Sheep Quantitative Trait Locus (QTL) Database (Sheep QTLdb)⁵. Названия анализируемых показателей соответствовали названию локусов количественных признаков, представленных в базе данных Sheep QTLdb.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Анализ сопоставления геномных координат островков ROH с актуальной версией базы данных SheepQTLdb выявил наличие 58 уникальных QTL, которые были представлены 29 показателями (рис. 1).

Среди них наиболее часто встречающимися были:

- ✓ живая масса (10,34%), масса жира в туше (8,62%),
- ✓ вес парной туши⁶ (6,9%),
- ✓ количество молока (удой) (6,9%).

Показатели «процент выхода мяса с пониженным содержанием жира», «процент жира в туше», «процент костей (прижизненно)», «масса мышц в туше», «плотность жира» имели долю в размере 5,17% каждый, а показатели «масса костей», «общее количество жира (прижизненное)», «плотность мышц», «содержание эйкозапентаеновой кислоты в мясе» — по 3,45% каждый.

Большая группа QTL, перекрывающихся с островками ROH, была ассоциирована с размерами туловища, живой массой и составом туш (табл. 2).

Большая группа идентифицированных QTL, локализованных в островках ROH, была ассоциирована с размерами туловища, живой массой и составом туш. Например, в островке ROH у русской длинношерстной породы был идентифицирован QTL 14238, который впервые выявлен в исследованиях британской коммерческой мясной породы шароле и ассоциирован с глубиной длиннейшей мышцы спины [8].

QTL 57674 в островке ROH у андийской породы на второй хромосоме был впервые обнаружен в одной из самых значимых научных работ по

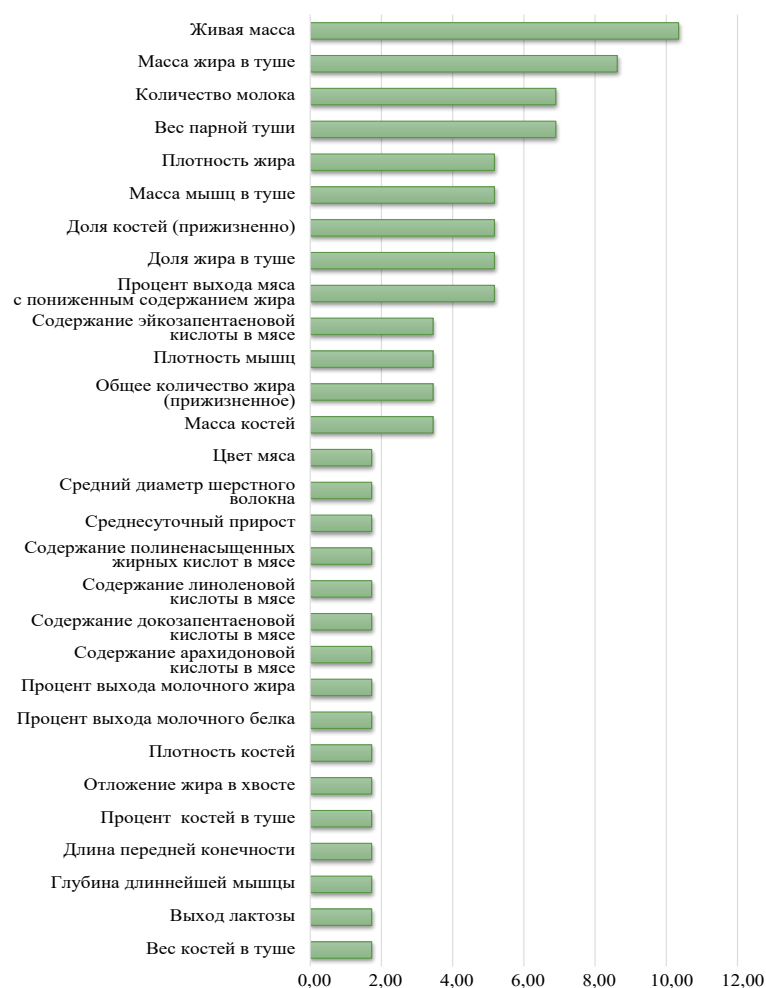
Таблица 1. Краткая характеристика изучаемых пород овец с указанием геномных координат идентифицированных островков гомозиготности

Table 1. Brief description of the studied sheep breeds with indication of the coordinates of the identified ROH islands

Порода овец	Аббревиатура	n*	Геномная координата островка ROH	Фенотип	
				шерсть	хвост
Андийская	ANDB	17	2:193342564-194090177 10:37886155-37951140	ГР	ДЖ
Буубэй	BUUB	39	10:37886155-40036146 13:51727898-53186320	ГР	КЖ
Волгоградская	VOLG	37	6:40449774-42930840	ТК	ДТ
Забайкальская	BKFF	15	10:38159341-39605193	ТК	ДТ
Карачаевская	KRCH	43	13:51576061-52895998	ГР	ДЖ
Кулундинская	KLND	16	6:40449774-41936490	ТК	ДТ
Кучугуровская	KUCH	16	2:78429659-78825486 10:38159341-38586588 13:51576061-52740696	ГР	ДЖ
Куйбышевская	KUIB	15	10:38073170-40036146	ПТК	ДТ
Романовская	RMNV	36	2:121773045-122317137 10:43095152-44407983 10:44569028-45082466	ГР	КТ
Русская длинношерстная	RULH	32	1:112076929-112480565	ПТК	ДТ

Примечание: n* — финальная исследуемая выборка; тип шерсти: ГР — грубая, ПТК — полутонкая, ТК — тонкая; тип хвоста: ДЖ — длинный жирный, ДТ — длинный тощий, КЖ — короткий жирный, КТ — короткий тощий.

Рис. 1. Доли показателей, соответствующих идентифицированным QTL
Fig. 1. Proportions of traits corresponding to identified QTL



⁵ <https://www.animalgenome.org/cgi-bin/QTLdb/OA/index>

⁶ Согласно ГОСТ 31777-2012 Овцы и козы для убоя. Баранина, ягнятина и козлятина в тушах.

Таблица 2. Список QTL, локализованных в островках ROH, в геномах 10 пород овец, разводимых в России

Table 2. List of QTLs localized in ROH islands in the genomes of ten sheep breeds raised in Russia

Название показателя согласно SheepQTLdb	Id QTL	Порода	Регион, выявленный в исследовании, м. п. н.
1	2	3	4
QTL на OAR1			
Глубина длинной мышцы (Longissimus muscle depth)	14238	RULH	104,23–104,62
Вес костей в туше (Bone weight in carcass)	14275		
Масса мышц в туше (Muscle weight in carcass)	14276		
Доля жира в туше / Carcass fat percentage	14277		
Содержание эйкозапентаеновой кислоты в мясе (Meat eicosapentaenoic acid content)	17215		
Содержание полиненасыщенных жирных кислот в мясе (Meat polyunsaturated fatty acid content)	17221		
QTL на OAR2			
Вес парной туши (Hot carcass weight)	13796	RMNV	113,9–114,45
	14279	RMNV	
	14253	ANDB	182,50–183,16
	14279	ANDB	182,50–183,16
Выход лактозы (Milk lactose yield)		KUCH	73,64–73,93
	13991	ANDB	182,50–183,16
	14254	ANDB	182,50–183,16
		ANDB	182,50–183,16
Живая масса (Body weight)	14280	KUCH	73,64–73,93
		RMNV	113,9–114,45
	57674	ANDB	182,50–183,16
Количество молока (Milk yield)	13992	ANDB	182,50–183,16
	14147	ANDB	182,50–183,16
Процент выхода молочного белка (Milk protein percentage)		ANDB	182,50–183,16
	57738	KUCH	73,64–73,93
		RMNV	113,9–114,45
Процент выхода молочного жира (Milk fat percentage)		ANDB	182,50–183,16
	13915	KUCH	73,64–73,93
		RMNV	113,9–114,45
Содержание арахидоновой кислоты в мясе (Meat arachidonic acid content)		ANDB	182,50–183,16
	17213	KUCH	73,64–73,93
		RMNV	113,9–114,45
Содержание докозапентаеновой кислоты в мясе (Meat docosapentaenoic acid content)		ANDB	182,5–183,16
	17217	RMNV	113,9–114,45
		KUCH	73,64–73,93
Содержание линоленовой кислоты в мясе (Meat linolenic acid content)		ANDB	182,50–183,16
	17210	KUCH	73,64–73,93
		RMNV	113,9–114,45
Содержание эйкозапентаеновой кислоты в мясе (Meat eicosapentaenoic acid content)		ANDB	182,50–183,16
	17214	KUCH	73,64–73,93
Цвет мяса (Meat color)	14163	RMNV	113,9–114,45
QTL на OAR6			
Вес парной туши (Hot carcass weight)	14260	VOLG	36,23–38,55
	14283	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
Доля жира в туше (Carcass fat percentage)		KLND	36,23–37,69
	14285	VOLG	36,23–38,55
		VOLG	36,23–38,55
Доля костей (Bone area)		VOLG	36,23–38,55
	95798	VOLG	36,23–38,55
		KLND	36,23–37,69
		KLND	36,23–37,69

проведению тонкого картирования QTL, ассоциированных с живой массой у овец [9]. В этой работе с целью проведения GWAS была генотипирована 1781 овца породы австралийский меринос, происходящих из чистопородных семейств полусибсов, для которых фиксировалась живая масса после отъема.

Островок ROH у овец волгоградской и кулундинской пород на шестой хромосоме пересекался по своим геномным координатам с несколькими QTL (95777–95864), ассоциированными с количеством мышечной, костной и жировой ткани в составе туши. Все эти QTL были внесены в базу данных SheepQTLdb в результате GWAS [10], для которого геномная составляющая была представлена SNP-генотипами 600 ягнят породы шотландская черномордая, а фенотипическая составляющая (состав туши) определена прижизненно с использованием метода компьютерной томографии.

На первой и второй хромосомах в островках ROH были расположены QTL, ассоциированные с жирнокислотным составом баранины, включая содержание линоленовой (17210), арахидоновой (17213), эйкозапентаеновой (17214, 17215), докозапентаеновой (17217) кислоты и полиненасыщенных жирных кислот (17221). Все эти QTL были впервые идентифицированы после проведения анализа геномной изменчивости овец двух линий шотландской черномордой породы: одна линия производила мясо с низким содержанием жира и высоким содержанием белка, вторая — мясо с выраженной жировой прослойкой [11]. У овец романовской породы островок ROH на второй хромосоме совпадал по геномным координатам с QTL 13796 и 14163, ассоциированными с длиной передней конечности и цветом мяса соответственно. Первый из них был выявлен в свободноживущей популяции овец соаэи (588 голов) с использованием 251 микросателлита [12]. О наличии второго QTL впервые сообщили P.L. Johnson *et al.* (2005) в исследовании генетических аспектов, влияющих на качество мяса ножек у тексел из Новой Зеландии [13].

На шестой хромосоме у волгоградской породы был идентифицирован QTL 14017, ассоциированный

1	2	3	4
Живая масса (Body weight)	13934	VOLG	36,23–38,55
	14261	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
		14284	VOLG
Масса жира в туше (Fat weight in carcass)	14282	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
	14332	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
	95820	VOLG	36,23–38,55
	95822	KLND	36,23–37,69
Масса костей (Total bone)	95777	VOLG	36,23–38,55
		95787	KLND
Масса мышц в туше (Muscle weight in carcass)	14333	VOLG	36,23–38,55
Общее количество жира (Total fat area)	95838	KLND	36,23–37,69
	95839	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
Плотность жира (Fat density)	95832	VOLG	36,23–38,55
	95840	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
		95850	VOLG
Плотность костей (Bone density)	95805	VOLG	36,23–38,55
Плотность мышц (Muscle density)	95863	VOLG	36,23–38,55
	95864	KLND	36,23–37,69
		VOLG	36,23–38,55
Процент выхода мяса с пониженным содержанием жира (Lean meat yield percentage)	14286	KLND	36,23–37,69
VOLG		36,23–38,55	
Среднесуточный прирост (Average daily gain)	13950	VOLG	36,23–38,55
Средний диаметр шерстного волокна (Mean fiber diameter)	14017	VOLG	36,23–38,55
QTL на OAR10			
Масса жира в туше (Fat weight in carcass)	14292	ANDB	37,40–44,5
Доля костей в туше (Carcass bone percentage)	14293	BKFF	
Доля жира в туше (Carcass fat percentage)	14294	BUUB	
Процент выхода мяса с пониженным содержанием жира (Lean meat yield percentage)	14295	KUCH	
QTL на OAR13			
Масса мышц в туше (Muscle weight in carcass)	14301	BUUB	48,34–49,71
Отложение жира в хвосте (Tail fat deposition)	127011	KRCH	
Количество молока (удой) (Milk yield)	170597, 170598	KUCH	

со средним диаметром шерстного волокна и впервые описанный в экспериментальной ресурсной популяции из 1109 ягнят, полученных от скрещивания 30 баранов и 415 овцематок синтетической породы INRA401 [14].

В островках ROH на тринадцатой хромосоме у буубэй и карачаевской породы был выявлен QTL 127011, ассоциированный с отложением жира в области хвоста. Этот QTL впервые был обнаружен в исследованиях, посвященных поиску признаков отбора в отношении типа хвостов у китайских аборигенных овец [15]. Буубэй и карачаевская — это жирнохвостые породы, поэтому этот QTL может быть связан с жиросотложением в области хвоста и у данных пород.

Доля QTL, ассоциированных с молочной продуктивностью, была довольно высока (12%).

У трех пород (карачаевской, кучугуровской, буубэй) было выявлено пересечение островка ROH с двумя QTL (170597 и 170598) на тринадцатой хромосоме. Информация об этих QTL появилась благодаря анализу CNV в геноме овец молочной породы валле-дель-белличе [16].

Для повышения точности картирования некоторые научные группы использовали в качестве объектов исследования ресурсные популяции. Авторы нашли пересечение островка ROH на второй хромосоме у овец андийской, кучугуровской и романовской пород с QTL 13915, ассоциированным с процентным содержанием молочного жира. Этот QTL был выявлен в результате поиска генетических механизмов, лежащих в основе регулирования молочной продуктивности в популяции овец испанской молочной породы чурра, состоящей из 11 семейств полусибсов (всего 1213 овец) [17]. Другой QTL (57738), связанный с процентным выходом молочного белка, был локализован в островке ROH на второй хромосоме. Открытие этого QTL стало возможным благодаря применению комплексного методического подхода к анализу полногеномных SNP-генотипов от 1696 овец породы чурра, отобранных из 16 семейств полусибсов [18]. Еще один QTL 14147, ассоциированный с количеством молока и локализованный в островке ROH у андийской породы на второй хромосоме, был картирован в ресурсной популяции возвратных кроссов, полученных от скрещивания баранов молочной восточнофризской породы и овцематок породы дорсет, с использованием

95 микросателлитных локусов [19].

Авторы выявили пересечения островков ROH с большой группой QTL на первой (14275–14278), второй (13991, 13992, 14253, 14254, 14279, 14280), шестой (13934, 13950, 14260, 14261, 14282–14286, 14332, 14333), десятой (14292–14295) и тринадцатой (14301) хромосомах. Эти QTL примечательны тем, что они были впервые описаны в эксперименте, проведенном в семействе возвратных кроссов (авасси × меринос) × меринос, которое было заложено при участии одного барана-родоначальника. Цель закладки такого семейства полусибсов — это идентификация QTL, ассоциированных с откормочной, мясной и молочной продуктивностью. Картирование проводили с использованием микросателлитных локусов (от 189 до 200), расположенных на аутосомах

овец. В зависимости от того, какой специфический признак изучался, у помесного потомства проводился сбор интересующих фенотипических признаков.

В первом эксперименте [20] 510 возвратных кроссов были задействованы для конструирования генетической карты неравновесного сцепления для идентификации QTL, в том числе QTL 13934, связанного с живой массой, и 13950, ассоциированного со среднесуточным приростом, на шестой хромосоме. Во второй работе были описаны новые QTL, связанные с молочной продуктивностью [21]. Среди прочих были выявлены QTL 13991 и 13992, ассоциированные с выходом лактозы и количеством молока, соответственно, и расположенные в островках ROH в настоящей работе.

В третьем эксперименте животные были разделены на две группы для оценки состава туловища, зафиксированные *in vivo* перед убоем в возрасте 2 (1-я группа) и 3,5 (2-я группа) лет с помощью компьютерной томографии [22]. В результате регрессионного анализа были выявлены 28 QTL, ассоциированных с показателями мясной и откормочной продуктивности, среди которых многие пересекались с островками ROH в данной работе.

Авторы этих работ предположили, что результаты следует проверить в других породах с использованием высокопроизводительных платформ для SNP-генотипирования. Вероятно, результаты авторов, полученные на основе анализа полногеномных SNP-генотипов и представленные выше, могут быть рассмотрены в качестве такого подтверждения, так как увеличение количества анализируемых маркеров позволяет значительно повысить точность картирования QTL. Это было экспериментально подтверждено на примере австралийской популяции крупного рогатого скота красного корня: использование данных полных геномов вместо чипов высокой плотности в среднем дало 3%-ное улучшение точности картирования QTL [23].

Кроме того, ранее авторы проводили GWAS по поиску ассоциаций SNP с живой массой и

размерами туловища в специально созданной кроссбредной популяции возвратных кроссов, полученных от скрещивания овцематок романовской породы и F1 гибридных баранов (романовская × катадин). В результате были обнаружены достоверные ассоциации SNP, расположенных внутри QTL (например, 14276, 14301 и 95793), о которых сообщалось выше, с размерами туловища у овец [24]. Это в свою очередь указывает на то, что перечисленные выше QTL представляют интерес для внедрения в селекционный процесс. Так, например, разработанные тест-системы для определения аллельных вариантов генов *DGKH* и *PPP1R1C*, ассоциированных с живой массой у овец и идентифицированных ранее в ходе GWAS, используются в маркерной селекции овец южной мясной породы и для отбора животных для создания новой мясной породы линияющих овец [25].

Выводы/Conclusions

На одной и той же хромосоме многие QTL были общими для островков ROH, имеющими несколько смещенные границы у разных пород. Можно предположить, что человек проводил отбор более крупных и быстрорастущих животных для создания предковых групп современных пород, поэтому много QTL, пересекающихся с островками ROH, ассоциировано в той или иной мере с размерами туловища.

Проведение тонкого картирования QTL стало возможным с разработкой ДНК-чипов, позволяющих проводить одновременное генотипирование десятков тысяч SNP, равномерно распределенных по геному. Однако большое число QTL, включенных в базу SheepQTLdb, были картированы ранее с использованием панелей микросателлитных локусов и имеют большой доверительный интервал.

В связи с этим настоящее исследование может быть рассмотрено в аспекте валидации ранее идентифицированных QTL, геномные варианты внутри которых могут быть рекомендованы для внедрения в маркерную селекцию в овцеводстве.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.
Автор несет ответственность за плагиат.
Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the submitted data.
The author is responsible for plagiarism.
The author declared no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FGGN-2024-0015).

FUNDING

The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FGGN-2024-0015).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jahuey-Martínez F.J., Martínez-Quintana J.A., Rodríguez-Almeida F.A., Parra-Bracamonte G.M. Exploration and Enrichment Analysis of the QTLome for Important Traits in Livestock Species. *Genes*. 2024; 15(12): 1513. <https://doi.org/10.3390/genes15121513>
2. Hu Z.-L., Park C.A., Reecy J.M. Bringing the Animal QTLdb and CorrDB into the future: meeting new challenges and providing updated services. *Nucleic Acids Research*. 2022; 50(D1): D956–D961. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab1116>
3. Gou Y. *et al.* AnimalGWASAtlas: Annotation and prioritization of GWAS loci and quantitative trait loci for animal complex traits. *Journal of Biological Chemistry*. 2025; 301(3): 108267. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2025.108267>

REFERENCES

1. Jahuey-Martínez F.J., Martínez-Quintana J.A., Rodríguez-Almeida F.A., Parra-Bracamonte G.M. Exploration and Enrichment Analysis of the QTLome for Important Traits in Livestock Species. *Genes*. 2024; 15(12): 1513. <https://doi.org/10.3390/genes15121513>
2. Hu Z.-L., Park C.A., Reecy J.M. Bringing the Animal QTLdb and CorrDB into the future: meeting new challenges and providing updated services. *Nucleic Acids Research*. 2022; 50(D1): D956–D961. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab1116>
3. Gou Y. *et al.* AnimalGWASAtlas: Annotation and prioritization of GWAS loci and quantitative trait loci for animal complex traits. *Journal of Biological Chemistry*. 2025; 301(3): 108267. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2025.108267>

4. Macé T. *et al.* Genome-wide analyses reveal a strong association between LEPR gene variants and body fat reserves in ewes. *BMC Genomics*. 2022; 23: 412.
<https://doi.org/10.1186/s12864-022-08636-z>
5. Zhang W., Lu Z., Guo T., Yuan C., Liu J. Construction of a high-density genetic map and QTL localization of body weight and wool production related traits in Alpine Merino sheep based on WGR. *BMC Genomics*. 2024; 25: 641.
<https://doi.org/10.1186/s12864-024-10535-4>
6. Yuan C. *et al.* A global analysis of CNVs in Chinese indigenous fine-wool sheep populations using whole-genome resequencing. *BMC Genomics*. 2021; 22: 78.
<https://doi.org/10.1186/s12864-021-07387-7>
7. Koncagül S., Kiraz S., Koyun H. Detection of putative loci affecting milk yield in Turkish Awassi sheep using microsatellite markers. *Tropical Animal Health and Production*. 2024; 56(8): 322.
<https://doi.org/10.1007/s11250-024-04165-x>
8. Matika O. *et al.* Characterization of OAR1 and OAR18 QTL associated with muscle depth in British commercial terminal sire sheep. *Animal Genetics*. 2011; 42(2): 172–180.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02121.x>
9. Al-Mamun H.A., Kwan P., Clark S.A., Ferdosi M.H., Tellam R., Gondro C. Genome-wide association study of body weight in Australian Merino sheep reveals an orthologous region on OAR6 to human and bovine genomic regions affecting height and weight. *Genetics Selection Evolution*. 2015; 47: 66.
<https://doi.org/10.1186/s12711-015-0142-4>
10. Matika O. *et al.* Genome-wide association reveals QTL for growth, bone and in vivo carcass traits as assessed by computed tomography in Scottish Blackface lambs. *Genetics Selection Evolution*. 2016; 48: 11.
<https://doi.org/10.1186/s12711-016-0191-3>
11. Karamichou E., Richardson R.I., Nute G.R., Gibson K.P., Bishop S.C. Genetic analyses and quantitative trait loci detection, using a partial genome scan, for intramuscular fatty acid composition in Scottish Blackface sheep. *Journal of Animal Science*. 2006; 84(12): 3228–3238.
<https://doi.org/10.2527/jas.2006-204>
12. Beraldi D., McRae A.F., Gratten J., Slate J., Visscher P.M., Pemberton J.M. Mapping quantitative trait loci underlying fitness-related traits in a free-living sheep population. *Evolution*. 2007; 61(6): 1403–1416.
<https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00106.x>
13. Johnson P.L., McEwan J.C., Dodds K.G., Purchas R.W., Blair H.T. Meat quality traits were unaffected by a quantitative trait locus affecting leg composition traits in Texel sheep. *Journal of Animal Science*. 2005; 83(12): 2729–2735.
<https://doi.org/10.2527/2005.83122729x>
14. Ponz R. *et al.* Assessment of genetic variation explained by markers for wool traits in sheep via a segment mapping approach. *Mammalian Genome*. 2001; 12(7): 569–572.
<https://doi.org/10.1007/s003350030007>
15. Yuan Z. *et al.* Selection signature analysis reveals genes associated with tail type in Chinese indigenous sheep. *Animal Genetics*. 2017; 48(1): 55–66.
<https://doi.org/10.1111/age.12477>
16. Di Gerlando R. *et al.* Genome-wide association study between CNVs and milk production traits in Valle del Belice sheep. *PLoS ONE*. 2019; 14(4): e0215204.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215204>
17. Gutiérrez-Gil B. *et al.* Quantitative trait loci underlying milk production traits in sheep. *Animal Genetics*. 2009; 40(4): 423–434.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2009.01856.x>
18. García-Gómez E., Gutiérrez-Gil B., Suárez-Vega A., de la Fuente L.F., Arranz J.J. Identification of quantitative trait loci underlying milk traits in Spanish dairy sheep using linkage plus combined linkage disequilibrium and linkage analysis approaches. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(9): 6059–6069.
<https://doi.org/10.3168/jds.2013-6824>
19. Mateescu R.G., Thonney M.L. Genetic mapping of quantitative trait loci for milk production in sheep. *Animal Genetics*. 2010; 41(5): 460–466.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02045.x>
20. Raadsma H.W. *et al.* Mapping quantitative trait loci (QTL) in sheep. I. A new male framework linkage map and QTL for growth rate and body weight. *Genetics Selection Evolution*. 2009; 41: 34.
<https://doi.org/10.1186/1297-9686-41-34>
21. Cavanagh C.R., Jonas E., Hobbs M., Thomson P.C., Tammen I., Raadsma H.W. Mapping Quantitative Trait Loci (QTL) in sheep. III. QTL for carcass composition traits derived from CT scans and aligned with a meta-assembly for sheep and cattle carcass QTL. *Genetics Selection Evolution*. 2010; 42: 36.
<https://doi.org/10.1186/1297-9686-42-36>
4. Macé T. *et al.* Genome-wide analyses reveal a strong association between LEPR gene variants and body fat reserves in ewes. *BMC Genomics*. 2022; 23: 412.
<https://doi.org/10.1186/s12864-022-08636-z>
5. Zhang W., Lu Z., Guo T., Yuan C., Liu J. Construction of a high-density genetic map and QTL localization of body weight and wool production related traits in Alpine Merino sheep based on WGR. *BMC Genomics*. 2024; 25: 641.
<https://doi.org/10.1186/s12864-024-10535-4>
6. Yuan C. *et al.* A global analysis of CNVs in Chinese indigenous fine-wool sheep populations using whole-genome resequencing. *BMC Genomics*. 2021; 22: 78.
<https://doi.org/10.1186/s12864-021-07387-7>
7. Koncagül S., Kiraz S., Koyun H. Detection of putative loci affecting milk yield in Turkish Awassi sheep using microsatellite markers. *Tropical Animal Health and Production*. 2024; 56(8): 322.
<https://doi.org/10.1007/s11250-024-04165-x>
8. Matika O. *et al.* Characterization of OAR1 and OAR18 QTL associated with muscle depth in British commercial terminal sire sheep. *Animal Genetics*. 2011; 42(2): 172–180.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02121.x>
9. Al-Mamun H.A., Kwan P., Clark S.A., Ferdosi M.H., Tellam R., Gondro C. Genome-wide association study of body weight in Australian Merino sheep reveals an orthologous region on OAR6 to human and bovine genomic regions affecting height and weight. *Genetics Selection Evolution*. 2015; 47: 66.
<https://doi.org/10.1186/s12711-015-0142-4>
10. Matika O. *et al.* Genome-wide association reveals QTL for growth, bone and in vivo carcass traits as assessed by computed tomography in Scottish Blackface lambs. *Genetics Selection Evolution*. 2016; 48: 11.
<https://doi.org/10.1186/s12711-016-0191-3>
11. Karamichou E., Richardson R.I., Nute G.R., Gibson K.P., Bishop S.C. Genetic analyses and quantitative trait loci detection, using a partial genome scan, for intramuscular fatty acid composition in Scottish Blackface sheep. *Journal of Animal Science*. 2006; 84(12): 3228–3238.
<https://doi.org/10.2527/jas.2006-204>
12. Beraldi D., McRae A.F., Gratten J., Slate J., Visscher P.M., Pemberton J.M. Mapping quantitative trait loci underlying fitness-related traits in a free-living sheep population. *Evolution*. 2007; 61(6): 1403–1416.
<https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00106.x>
13. Johnson P.L., McEwan J.C., Dodds K.G., Purchas R.W., Blair H.T. Meat quality traits were unaffected by a quantitative trait locus affecting leg composition traits in Texel sheep. *Journal of Animal Science*. 2005; 83(12): 2729–2735.
<https://doi.org/10.2527/2005.83122729x>
14. Ponz R. *et al.* Assessment of genetic variation explained by markers for wool traits in sheep via a segment mapping approach. *Mammalian Genome*. 2001; 12(7): 569–572.
<https://doi.org/10.1007/s003350030007>
15. Yuan Z. *et al.* Selection signature analysis reveals genes associated with tail type in Chinese indigenous sheep. *Animal Genetics*. 2017; 48(1): 55–66.
<https://doi.org/10.1111/age.12477>
16. Di Gerlando R. *et al.* Genome-wide association study between CNVs and milk production traits in Valle del Belice sheep. *PLoS ONE*. 2019; 14(4): e0215204.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215204>
17. Gutiérrez-Gil B. *et al.* Quantitative trait loci underlying milk production traits in sheep. *Animal Genetics*. 2009; 40(4): 423–434.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2009.01856.x>
18. García-Gómez E., Gutiérrez-Gil B., Suárez-Vega A., de la Fuente L.F., Arranz J.J. Identification of quantitative trait loci underlying milk traits in Spanish dairy sheep using linkage plus combined linkage disequilibrium and linkage analysis approaches. *Journal of Dairy Science*. 2013; 96(9): 6059–6069.
<https://doi.org/10.3168/jds.2013-6824>
19. Mateescu R.G., Thonney M.L. Genetic mapping of quantitative trait loci for milk production in sheep. *Animal Genetics*. 2010; 41(5): 460–466.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2010.02045.x>
20. Raadsma H.W. *et al.* Mapping quantitative trait loci (QTL) in sheep. I. A new male framework linkage map and QTL for growth rate and body weight. *Genetics Selection Evolution*. 2009; 41: 34.
<https://doi.org/10.1186/1297-9686-41-34>
21. Cavanagh C.R., Jonas E., Hobbs M., Thomson P.C., Tammen I., Raadsma H.W. Mapping Quantitative Trait Loci (QTL) in sheep. III. QTL for carcass composition traits derived from CT scans and aligned with a meta-assembly for sheep and cattle carcass QTL. *Genetics Selection Evolution*. 2010; 42: 36.
<https://doi.org/10.1186/1297-9686-42-36>

22. Raadsma H.W., Jonas E., McGill D., Hobbs M., Lam M.K., Thomson P.C. Mapping quantitative trait loci (QTL) in sheep. II. Meta-assembly and identification of novel QTL for milk production traits in sheep. *Genetics Selection Evolution*. 2009; 41: 45. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-41-45>
23. Meuwissen T., van den Berg I., Goddard M. On the use of whole-genome sequence data for across-breed genomic prediction and fine-scale mapping of QTL. *Genetics Selection Evolution*. 2021; 53: 19. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00607-4>
24. Денискова Т.Е., Кошкина О.А., Петров С.Н., Сермягин А.А., Зиновьева Н.А. Идентификация генов-кандидатов, связанных с ростом и развитием овец из кроссбредной популяции, с использованием полногеномного поиска ассоциаций. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024; 25(2): 236–250. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.236-250>
25. Кошкина О.А., Денискова Т.Е., Зиновьева Н.А. Разработка и апробация тест-системы определения полиморфизма генов DGKH и PPP1R1C, ассоциированных с живой массой овец. *Аграрная наука*. 2023; (12): 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-80-84>

ОБ АВТОРЕ

Татьяна Евгеньевна Денискова

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
horarka@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5809-1262>

¹Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, г. о. Подольск, Московская обл., 142132, Россия

22. Raadsma H.W., Jonas E., McGill D., Hobbs M., Lam M.K., Thomson P.C. Mapping quantitative trait loci (QTL) in sheep. II. Meta-assembly and identification of novel QTL for milk production traits in sheep. *Genetics Selection Evolution*. 2009; 41: 45. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-41-45>
23. Meuwissen T., van den Berg I., Goddard M. On the use of whole-genome sequence data for across-breed genomic prediction and fine-scale mapping of QTL. *Genetics Selection Evolution*. 2021; 53: 19. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00607-4>
24. Deniskova T.E., Koshkina O.A., Petrov S.N., Sermyagin A.A., Zinovieva N.A. Identification of candidate genes associated with growth and development of sheep from a crossbred population using genome-wide association studies. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024; 25(2): 236–250 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.236-250>
25. Koshkina O.A., Deniskova T.E., Zinovieva N.A. Development and validation of a test system for determining the polymorphism in the DGKH and PPP1R1C genes associated with body weight of sheep. *Agrarian science*. 2023; (12): 80–84 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-80-84>

ABOUT THE AUTHOR

Tatiana Evgenievna Deniskova

Candidate of Biological Sciences,
Leading Researcher
horarka@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5809-1262>

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, 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

А.А. Белоус¹ ✉В.Р. Харзинова²Н.А. Чурбакова²Н.А. Зиновьева²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт интегрированного рыбоводства — филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста», пос. им. Воровского, Московская обл., Россия

²Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, г. о. Подольск, Московская обл., Россия

✉ belousa663@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.05.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Белоус А.А., Харзинова В.Р.,
Чурбакова Н.А., Зиновьева Н.А.

Anna A. Belous¹ ✉Veronika R. Kharzinova²Nadezhda A. Churbakova²Natalia A. Zinovieva¹

¹All-Russian Research Institute of Integrated Fish Farming — branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Vorovsky village, Noginsky district, Moscow region, Russia

²L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, Russia

✉ belousa663@gmail.com

Received by the editorial office: 01.05.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Belous A.A., Kharzinova V.R.,
Churbakova N.A., Zinovieva N.A.

Генетическая изоляция и идентичность свиней коммерческих пород и мангалицы

РЕЗЮМЕ

Современное свиноводство балансирует между интенсивным производством на основе высокопродуктивных пород (ландрас, крупная белая, дюрок) и сохранением генетического разнообразия аборигенных пород, таких как венгерская мангалица. Данное исследование направлено на выявление геномных различий между этими группами с использованием полногеномного генотипирования (PorcineHD BeadChip, 66 763 SNP) и анализа генетической дифференциации (Fst). При сравнении пород дюрок и мангалица выявлены 67 SNP и 118 генов, включая AHI1 (эмбриональное развитие), APLP2 (толщина шпика), HECTD2 (мясные качества) и VDAC1 (репродукция). Между крупной белой и породой мангалица обнаружены 97% сходства, идентифицированы 228 генов, среди которых MAPK4 (рост), RPAP3 (иммунитет), MGAT5 (внутримышечный жир) и EXOC4 (число сосков). Между породами ландрас и мангалица идентифицированы 82% сходства, обнаружены 195 генов, включая PTPRD (качество мяса), ITGA9 (устойчивость к АЧС) и NCAM2 (однородность потомства). Исследование вносит вклад в понимание генетических механизмов фенотипической изменчивости и предлагает инструменты для повышения эффективности селекции в свиноводстве.

Ключевые слова: SNP, генетическая дифференциация, Fst-анализ, свиньи, крупная белая порода, порода дюрок, порода ландрас, порода мангалица

Для цитирования: Белоус А.А., Харзинова В.Р., Чурбакова Н.А., Зиновьева Н.А. Генетическая изоляция и идентичность свиней коммерческих пород и мангалицы. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 110–120.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-110-120>

Genetic isolation and identity in pigs of russian and foreign populations

ABSTRACT

Modern pig production balances between intensive farming using high-performance breeds (Landrace, Large White, Duroc) and the conservation of genetic diversity in native breeds such as the Hungarian Mangalica. This study aims to identify genomic differences between these groups using whole-genome genotyping (PorcineHD BeadChip, 66,763 SNPs) and analysis of genetic differentiation (Fst). Duroc vs. Mangalica: 67 SNPs and 118 genes, including AHI1 (embryonic development), APLP2 (backfat thickness), HECTD2 (meat quality), and VDAC1 (reproduction). A 97% similarity was found between the Large White and Mangalitsa breeds, with 228 genes identified, including MAPK4 (growth), RPAP3 (immunity), MGAT5 (intramuscular fat) and EXOC4 (nipple number). Between the Landrace and Mangalitsa breeds, 82% similarity was identified, 195 genes were found, including PTPRD (meat quality), ITGA9 (ASF resistance) and NCAM2 (offspring uniformity). The study contributes to the understanding of genetic mechanisms of phenotypic variability and offers tools for improving the efficiency of selection in pig production.

Key words: SNP, genetic differentiation, Fst analysis, pigs, Large White breed, Duroc breed, Landrace breed, Mangalitsa breed

For citation: Belous A.A., Kharzinova V.R., Churbakova N.A., Zinovieva N.A. Genetic isolation and identity in pigs of Russian and foreign populations. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 110–120 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-110-120>

Введение/Introduction

В настоящее время переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания являются приоритетами научно-технологического развития нашей страны¹. Для его выполнения необходимо внедрять в системы определения и породоспецифичности животных, новые генетические методы, показавшие достоверность при их применении.

Современное свиноводство сталкивается с необходимостью балансировать между интенсивным производством, основанным на коммерческих породах (таких, как ландрас, крупная белая и дюрок), и сохранением генетического разнообразия уникальных аборигенных пород, таких как венгерская мангалица. Генетическая изоляция изучаемых групп свиней обусловлена различиями в селекционных стратегиях, адаптационных характеристиках и хозяйственном использовании. В то время как коммерческие породы отбираются по признакам скорости роста, мясности и эффективности кормления, мангалица сохраняет черты, ценные для экстенсивного пастбищного содержания, включая устойчивость к болезням, неприхотливость и высокое качество деликатесного мяса [1, 2].

Генетическая идентичность мангалицы, закрепленная в XIX веке, сегодня поддерживается благодаря усилиям селекционеров, тогда как коммерческие породы подвергаются постоянному кроссбридингу для улучшения продуктивности. Изучение геномных различий между этими группами позволяет не только разрабатывать стратегии сохранения биоразнообразия, но и выявлять гены, ассоциированные с ценными хозяйственными признаками, такими как устойчивость к стрессу или качество мраморного мяса [3, 4].

Исследования других авторов подтверждают актуальность темы и предоставляют эмпирические данные о генетических различиях. В работе 2024 года по популяционной структуре мангалицы (Population Subdivision and Migration Assessment) выявлено высокое генетическое разнообразие в венгерской популяции с низким уровнем миграции между стадами (61–75%), что подчеркивает необходимость программ сохранения для предотвращения инбридинга [5]. Аналогично в 2022 году анализ гомозиготности (runs of homozygosity) в локальных породах показал наивысшее разнообразие у красной мангалицы, но высокий инбридинг во всех вариациях породы с дифференциацией от коммерческих линий по генам, связанным с адаптацией [6].

В 2020 году полногеномное секвенирование европейских автохтонных и коммерческих пород (включая мангалицу, ландрас и дюрок) выявило

сигнатуры селекции на SSC1, 5, 9, 10, 11, 13 и 15, ассоциированные с адаптацией к окружающей среде и продуктивностью; автохтонные породы, включая мангалицу, кластеризовались ближе к диким кабанам, подтверждая их роль в сохранении биоразнообразия [7]. Исследование 2020 года с использованием EigenGWAS и Fst-анализа на породах дюрок, ландрас и йоркшир выявило 3062 сигнала селекции, покрывающих 6,54% генома, с генами (например, FSHB, AHR для репродукции; KIT, MC1R для цвета; RETREG1, PPARG для метаболизма жиров), что объясняет различия в росте и метаболизме по сравнению с аборигенными породами [8].

Российские авторы в 2020–2023 годах (паттерн генетического разнообразия локальных и коммерческих пород) отметили консолидированность мангалицы с черно-пестрой и беркширской породами с отличной структурой от коммерческих, подтверждая генетическую изоляцию и потенциал для кроссбридинга [9]. В 2025 году анализ лабораторных популяций (китайские и европейские породы) выявил адаптивные черты, включая устойчивость к стрессу, что актуально для интеграции генов мангалицы в коммерческие линии [10].

Данные результаты подчеркивают, что сохранение мангалицы не только способствует биоразнообразию, но и предоставляет генетический материал для улучшения коммерческих пород, повышая устойчивость и качество продукции в условиях изменяющегося климата.

Цель настоящего исследования — изучение генетического однообразия между венгерской породой мангалица и коммерческими породами свиней — крупной белой, ландрас и дюрок.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в 2024–2025 гг.

В качестве биологического материала для исследований была использована ДНК (выщип из ушной раковины) пород свиней дюрок ($n = 802$), ландрас ($n = 640$), мангалица ($n = 49$) и крупная белая ($n = 797$), разводимых в России, депонированных в Уникальной научной установке «Банк генетического материала домашних и диких видов животных и птицы» в составе сетевой биоресурсной коллекции сельскохозяйственных животных, птиц, рыб и насекомых (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.

Выделение ДНК проводили в ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста с помощью наборов серии «ДНК-Экстрен-2» (ЗАО «Синтол», Россия) в соответствии с протоколом фирмы-производителя.

¹ Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
<http://www.kremlin.ru/acts/bank/50358>

Концентрацию двухцепочечной ДНК определяли с помощью флуориметра Qubit 2.0 (Invitrogen/Life Technologies, США).

Для определения качества измеряли соотношение поглощающей способности образца ДНК на двух длинах волн — 260 нм и 280 нм (OD260/OD280) (спектрофотометр NanoDrop8000, ThermoFisher Scientific, США). Для анализа использовали ДНК с OD260/OD280 = 1,6–1,8. Кроме того, качество ДНК оценивали посредством гель-электрофореза в 1%-ном агарозном геле. Полногеномное генотипирование проводили с использованием высокоплотных ДНК-чипов PorcineHD Genotyping BeadChip (платформа GeneSeek Genomic Profiler, Neogene, США), содержащих 66 763 SNP.

Контроль качества данных, выполненный с использованием PLINK v1.90², определил удаление образцов и SNP ниже уровня генотипирования 95%.

Генетическая дифференциация, основанная на попарных значениях Fst, была рассчитана между всеми SNP с использованием PLINK 1.9 и SNP, входящие в 0,1% максимальных значений Fst, представляли отпечатки селекции.

Для поиска генов, в области которых идентифицированы SNP, использовали геномный ресурс Sscrofa11.1³.

Функциональные аннотации генов выполняли, анализируя отечественные и зарубежные литературные источники Elibrary, Pub Med, «Академия Google» не старше 10 лет.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В результате проведенных исследований после контроля качества осталось: в сравнении мангалицы с породой дюрок — 71 050 SNP, с крупной белой — 71 060 SNP, с породой ландрас — 53 643 SNP.

Как представлено в таблице 1, разница между средними значениями генетической дифференциации показывает

на неравномерное различие между изучаемыми группами пород. Так, между породой дюрок и мангалицей значение Fst 0,27 указывает на умеренную степень различий, где 27% обусловлено различием, остальные 80% — внутривидовой изменчивостью. Наибольшее сходство между породами наблюдается у ландраса и мангалицы, где Fst равен 0,08, или 8% изменчивости между породами.

При сравнительном анализе пород свиней дюрок и мангалица обнаружены 67 однонуклеотидных

Рис. 1. Генетическая дифференциация по значениям Fst изучаемых пород свиней (сверху вниз): 1) дюрок и мангалица; 2) крупная белая и мангалица; 3) ландрас и мангалица

Fig. 1. Genetic differentiation by Fst values of the studied pig breeds (from top to bottom): 1) duroc and mangalica; 2) large white and mangalica; 3) landrace and mangalica

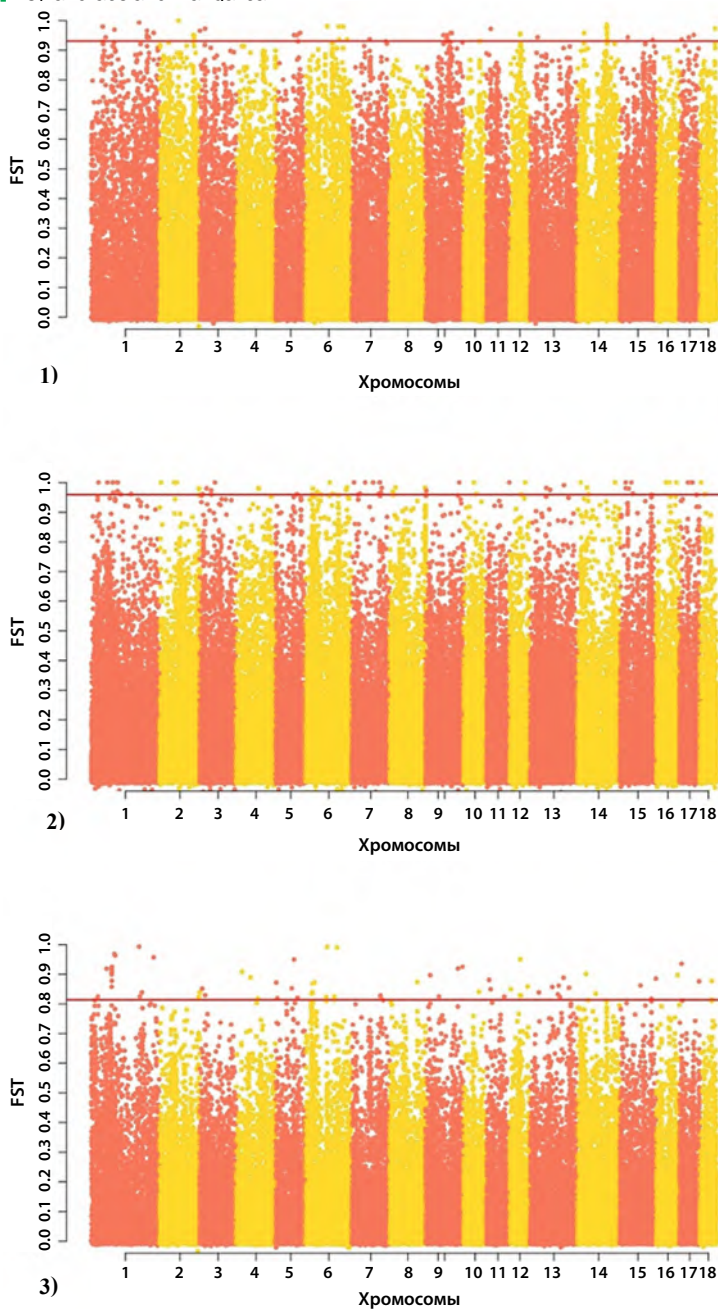


Таблица 1. Среднее значение Fst по изучаемым породам свиней

Table 1. Mean Fst value among studied pig breeds

Наименование сравниваемых пород	Среднее значение Fst
Дюрок и мангалица	0,27 ± 0,01
Крупная белая и мангалица	0,17 ± 0,01
Ландрас и мангалица	0,08 ± 0,01

² Whole genome association analysis toolset. PLINK 1.90. — URL: <https://www.cog-genomics.org/plink/>

³ Genome assembly Sscrofa11.1. — URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/assembly/GCF_000003025.6

полиморфизмов (SNP). Генетическое сходство между данными породами составляет 93%. Обнаружено 118 генов, причем 26 из них содержат указанные SNP. При сравнении другой пары пород (крупной белой и мангалицы) генетическое сходство достигает 97%. Были идентифицированы 228 генов, среди которых 29 содержат SNP.

По третьей паре пород (ландрас и мангалица) уровень генетического сходства составил 82%. Выявлены 195 генов и 28 генов, содержащих SNP соответственно (рис. 1).

Среди 118 обнаруженных генов (при сравнении пород дюрок и мангалица) особый интерес представляют 26 генов, внутри которых найдены SNP при анализе показателя Fst. К ним относятся следующие гены: ANH1, TPD52L1, PREP, DNAJB5, VDAC1, FBXL21, PRKAR1B, LPAR3, SGIP1, DAB1, APLP2, CDK14, MTERF1, MAGI2, PRTFDC1, FREM2, ANKFN1, PCGF5, HECTD2, BTAF1, CPEB3, MARCHF5, EXOC6, MYOF, PDE6C и TRIP12. Указанные гены локализованы на хромосомах 1–3, 6, 9–12, 14 и 15.

Анализ литературы по вышеуказанным генам позволил выявить, что 21 из них ранее имел связь с различными признаками свиней. Например, ген ANH1 принимает участие в эмбриональном и фетальном развитии йоркширской породы свиней [11]. Согласно результатам метаанализа, касающегося среднесуточного прироста свиней породы дюрок, был обнаружен ген TPD52L1 [12]. Исследования S. Moon и колл. (2015), проводившиеся на йоркширской популяции свиней, выявили связь гена DNAJB5 с белым окрасом шкуры животных [13].

Известно, что ген VDAC1 находится в плазматической мембране ооцитов свиньи и окружает кортикальную область. Этот ген синтезируется в ооцитах на стадиях зародышевого пузырька и мейоза II. Кроме того, он располагается в участках генома с высокой степенью гомозиготности (RON), которые связаны с репродуктивными признаками свиней китайской породы мейшан [14]. Установлено, что ген PRKAR1B, находящийся на участке хромосомы 3, тесно взаимодействует с генами PDGFA и DNAAF5, участвующими в синтезе тестостерона у свиней [15].

Белок Disabled-1 (DAB1) представляет собой адаптерный белок, играющий ключевую роль во внутриклеточной передаче сигналов от релина (важного внеклеточного белка, регулирующего развитие мозга у позвоночных). Экспрессия этого гена наблюдается в развивающихся областях коры головного мозга и мозжечка свиней [16].

Ранее проведенный анализ Fst между свиньями пород дюрок и кемеровская выявил ген APLP2, что свидетельствует о его специфичности для породы дюрок. Более того, этот ген коррелирует с толщиной шпика у помесных свиней второго поколения [17]. Исследования S. Kim и соавт. (2020) показывают, что ген CDK14 важен для динамики регуляции генов в процессе развития β - и

α -клеток свиньи, способствуя клеточному делению и прогрессии клеточного цикла [18].

Ген MAGI2 был отмечен в работах по изучению транскриптов свиней с пищевой мышечной дистрофией породы шацзилин. Он выступает в качестве маркера, определяющего дифференциацию сперматогонияльных стволовых клеток [19, 20]. Активируемый по экспрессии ген PRTFDC1 функционирует одинаково как у кур, так и у свиней. Его основная роль заключается в обеспечении функционирования обонятельных рецепторов [21]. Связанный с живой массой поросят при переходе на дорастивание ген FREM2 характеризуется несколькими ассоциациями с ранними стадиями развития организма [22].

Исследование D.N. Do и колл. (2013) установило взаимосвязь гена ANKFN1 с суточным потреблением корма у свиней породы дюрок, что подтверждает его влияние на поведение животных относительно кормления [23]. Ген PCGF5 был выявлен при сравнении африканских и коммерческих пород свиней, включая породу дюрок. Используемые методы анализа (iHS, XP-EHH и HapFLK) позволяют предположить уникальную природу данного гена и его закрепление в определенной породной популяции [24].

Ген HECTD2 был обнаружен и при анализе Fst между свиньями породы дюрок и африканскими породами. Установлена его ассоциация с мясными качествами [25].

Согласно исследованию M. Zappaterra и соавт. (2020), ген BTAF1 коррелирует с геном TBP, совместно вызывая серьезные нарушения накопления липидов. Предполагается, что оба гена играют значимую роль в регуляции транскриптомного каскада, связанного с различиями в отложении внутримышечного жира у свиней крупной белой породы [26]. Высококачественная сперма хряков, положительно влияющая на фертильность потомства, связана с функционированием гена CPEB3 [27].

Российский ученый И. Чернуха и соавт. (2022 г.) определили, что ген MARCHF5 является характерным признаком свиней породы дюрок [28]. Ассоциированный с нарушениями работы поджелудочной железы у мини-свиней породы Бама ген EXOC6 подчеркивает важность сбалансированного рациона питания [29]. Одним из недавно открытых маркеров, участвующих в процессе васкуляризации преовуляторных ооцитов в период роста и созревания, является ген MYOF. Помимо этого, он оказывает влияние на рост скелетных мышц у свиней крупной белой породы [30, 31].

Коммерческие породы свиней (дюрок, ландрас и крупная белая) характеризуются наличием гена PDE6C, ассоциированного с хозяйственно ценными признаками, важными для селекции. Биологическая значимость этого гена проявляется в его связи с остротой зрения, причем мутации способны привести к ее потере [32–34].

Наконец, ген TRIP12 оказался связанным с влагоудерживающими свойствами мяса у помесных свиней [35].

Попарный генетический анализ пород крупная белая и мангалица обнаружил 228 генов, из которых 29 содержат внутри себя SNP. Среди них выделяются такие гены, как KLHL32, PNISR, HMGN3, MAPK4, CARM1, TYW1, NME7, RPAP3, APCDD1, DAB1, TXNDC5, CCND3, EXD2, ZFYVE1, TGFB3, IFT43, NTRK2, WAC, TEX29, TEX14, RTN4RL1, R3HCC1, RNF34, MGAT5, MCPH1, ANXA6, PROCR, MROH8 и EXOC4.

Литературный обзор указанных генов подтвердил наличие аннотаций по 15 из них применительно к сфере свиноводства. Например, митогенактивируемая протеинкиназа 4 (MAPK4) способствует увеличению массы тела свиней йоркширской породы благодаря участию в процессах усвоения и расщепления углеводов и образования жиров [36]. Аргининметилтрансфераза 1 (CARM1) была исследована ученым Z. Cao и колл. (2021) и признана важным фактором развития бластоцисты, что крайне актуально для вопросов воспроизводства [37]. Иммунореактивный ген RPAP3, связанный с эффективной работой иммунной системы, низким уровнем потребления пищи и повышенной питательностью, был выявлен при геномном картировании образцов кожи и эмбрионов свиней 101 породы [38].

Китайский исследователь B. Zhang и колл. (2025) установили, что ген APCDD1 вовлечен в сигнальный путь Wnt (KEGG), представляющий древний механизм регулирования процессов развития тканей, поддерживающий гомеостаз и обеспечивающий нормальное течение эмбриогенеза и клеточную дифференцировку [39]. Метод полногеномного ассоциативного анализа на основе геномных оценок племенной ценности позволил обнаружить ген CCND3, оказывающий влияние на средний вес новорожденных поросят [40].

Последовательное изучение генома свиней китайской породы лицзян позволило выявить ген ZFYVE1, действующий совместно с генами FAM161B, LIN52 и VRTN и влияющий на формирование грудного отдела позвоночника [41]. За вариацию количества ребер у свиней несет ответственность ген TGFB3 [42]. Маркером, определяющим число сосков у свиноматок крупной белой породы, признан ген IFT43 [43].

Z. Yan и колл. (2024) провели исследование транскриптома сперматогенеза у четырехмесячных половозрелых свиней местной китайской породы и обнаружили, что ген TEX29, ответственный за воспроизводительные показатели, проявляет активность в сперматиде и образует кластеры вместе с генами ACRV1, ACR и SPACA1 [44]. Напротив, ген TEX14 способен приводить к бесплодию у свиней [45].

Ученый D. Crespo-Piazuolo и колл. (2023) отметили, что ген R3HCC1 демонстрирует предрасположенность к заболеванию сальмонеллезом,

однако после инфицирования его экспрессия снижается в нейтрофилах свиней [46].

Впервые роль гена ANXA6 в формировании трофобластической бластоцисты свиней была установлена исследователем P. Ramos-Ibeas и колл. (2019). Полученная информация важна для разработки методов трансплантации эмбрионов [47].

Ген MGAT5 был выявлен при сопоставлении свиней местных корейских пород с коммерческой породой йоркшир. Известно, что он связан с накоплением внутримышечного жира у свиней породы крупная белая, что критически важно при производстве продуктов типа хамон [48, 49].

Y. He и колл. (2021) зафиксировали SNP rs81471943 (C/T), располагающийся в гене EXOC4. Проведенный ими анализ связи между генотипом EXOC4 и репродуктивной функцией свиней породы дюрок выявил три варианта генотипа (CC, CT и TT), при этом аллель C оказался преобладающим [50].

Ранние исследования S.C. Hernandez (2014), T. Tribout (2008) и N. Duijvesteijn и колл. (2014) подтвердили существование трех количественных признаков (QTL) на 18-й хромосоме, достоверно связанных с количеством сосков. Таким образом, ген EXOC4 потенциально влияет на лактационные показатели свиней коммерческих пород [51–53].

Сравнительное исследование пород ландрас и мангалица выявило 195 генов, из которых 28 содержат внутри себя SNP. К таким генам относятся ZBTB2, ARMC2, MLLT3, PTPRD, JAKMIP2, BAIAP2L1, RB1CC1, EFCAB6, SLC41A2, CDH8, KAZN, NDC80, FHOD3, SIPA1L1, GAB2, COLGALT2, FRMD4A, FRY, TRPC4, UGGT2, ANKFN1, MSI2, ITGA9, NMNAT3, NCAM2, HDAC4, ADCY2 и BBS9.

Проведенный анализ литературных источников показал, что 17 из перечисленных генов были описаны в предшествующих исследованиях. Например, ген ARMC2, согласно работе E. Dervishi и колл. (2023), взаимосвязан с аминокислотами L-гистидин и L-лизин в популяции гибридных свиней-кроссбредов F1 (n = 968) [54]. Аналогичные сведения представлены в исследовании W. Chen и колл. (2023), где показано взаимодействие этого гена с возрастным достижением живым весом 100 кг у свиней породы дюрок [55].

Содержание внутримышечного жира (IMF) у 914 свиней иберийской породы связано с геном MLLT3. Транскриптомный анализ РНК длиннейшей мышцы спины выявил этот ген как перспективный маркер для улучшения мясных характеристик, таких как мраморность и сочность мяса [56].

Другой важный ген — PTPRD (белок тирозинфосфатаза), играющий существенную роль в улучшении качества свинины [57, 58]. Особое внимание заслуживает работа M. Raschetti и соавт. (2013), где были проанализированы пять SNP у 560 итальянских свиней крупной белой породы с экстремальными оценками племенной ценности (EBV) по толщине жира. Дополнительно рассматривались 600 особей трех итальянских

пород (крупная белая, дюрок, ландрас) с лучшими EBV по признакам толщины жира и скорости роста. Исследование показало, что мутация PIK3R2 с.2966C > T значительно связана с такими показателями, как толщина шпика, среднесуточный прирост, скорость конверсии корма и выход постного мяса. Другой SNP — PTPRD с.2680C > T — продемонстрировал значимую связь с весом бедра у свиней крупной белой породы [59].

Анализ полногеномных ассоциативных исследований по количеству мертворожденных поросят у свиней крупной белой породы выявил ген BAIP2L1, увеличивающий вероятность этого неблагоприятного явления [59]. Исследования на свиньях йоркширской породы, выращиваемых в Корее, показали, что ген CDH8 связан с толщиной шпика. По терминологии генной онтологии он относится к организации адгезивных соединений, кальцийзависимой межклеточной адгезии, сборке межклеточных соединений и комплексу катенина [60].

Российские ученые установили, что ген KAZN влияет на количество живорожденных поросят у свиней крупной белой породы [61]. Еще один ген — ADCY2 — у этой породы связан с репродуктивными признаками, такими как возраст первого осеменения и первого опороса [62]. Ген FHOD3 рассматривается как один из кандидатов, сцепленных с воспроизводственными характеристиками свиней породы дюрок и мясными качествами товарных гибридов третьего поколения [63, 64]. Мутация гена BBS9 увеличивает смертность поросят свиней коммерческих пород [65].

Исследователь S. Vovo и соавт. (2022) на выборке из 1000 свиней породы дюрок итальянской селекции выявили потенциальный QTL на хромосоме 10, содержащий область гена FRMD4A [66]. Ген TRPC4 был найден в зонах выбросов Fst у свиней крупной белой породы, выращиваемых на одной ферме в разные периоды: группа LW_A (2008–2010 гг., российская селекция) и группа LW_B (2014–2016 гг., европейская селекция) [33].

Ген ANKFN1 ранее был идентифицирован как фактор риска расстройств, связанных с употреблением психоактивных веществ у людей. Однако в исследованиях D.N. Do и соавт. (2013) он оказался связан с кормовым поведением свиней породы дюрок [23, 67]. Эти же авторы выявили ген MIS2 (гомолог 2 Musashi), который коррелирует с количеством ежедневных визитов к кормушке и кодирует РНК-связывающий белок, играющий важную роль в посттранскрипционной регуляции генов у млекопитающих [23].

Исследование F. Qi (2024) на двух группах свиней китайской породы Xiang показало, что ген ITGA9 (расположен на 13-й хромосоме, SNP ALGA0116366) предположительно участвует в адаптации организма к вирусу африканской чумы свиней (АЧС) [68].

Зоотехническими показателями (живой массой, экстерьером, возрастом и физиологическим

состоянием) однородности поросят управляет ген NCAM2. Благодаря этому показателю возможно повышение эффективности производства свинины, как отмечено в исследованиях Y.X. Zhao и соавт. (2022) [40].

Ген NMNAT3, изучавшийся на свиньях пекинской черной породы, связан с потерей влаги в мясе и, вероятно, влияет на метаболизм мышечной ткани и водный баланс клеток [69].

Ген HDAC4 регулирует процессы миогенеза у свиней, стимулируя пролиферацию и миграцию клеток скелетных мышц на уровне экспрессии мРНК и белков [70].

Все вышерассмотренные гены удовлетворяют функциональному критерию, поскольку обладают доказанной взаимосвязью с биологическими признаками. Они являются ключевыми участниками фенотипических различий между основными породами свиней, такими как крупная белая, ландрас, дюрок и мангалица.

Выводы/Conclusions

В ходе исследования проведено генетическое сравнение свиней пород дюрок, крупная белая и ландрас с мангалицей, что позволило выявить значимые SNP и гены, ассоциированные с ключевыми хозяйственно полезными признаками.

При сравнении пород дюрок и мангалица, генетическое сходство которых составляет 93%, обнаружены 67 SNP и 118 генов, из которых 26 содержат SNP, включая гены, связанные с ростом (AH11, TPD52L1), мясными качествами (APLP2, HECD2), репродукцией (VDAC1, PRKAR1B) и обменом веществ (DNAJB5, FBXL21).

У пород крупная белая и мангалица (97% сходства) выявлены 228 генов, из которых 29 содержат SNP, включая гены, влияющие на развитие (MAPK4, CARM1), иммунитет (RPAP3), качество мяса (MGAT5) и репродукцию (EXOC4).

Для ландраса и мангалицы (82% сходства) идентифицированы 195 генов, из которых 28 содержат SNP, в том числе гены, связанные с мясными характеристиками (PTPRD, MLLT3), устойчивостью к болезням (ITGA9) и однородностью потомства (NCAM2).

Полученные данные могут быть использованы для:

- 1) селекции — маркер-опосредованный отбор по генам, влияющий на продуктивность и устойчивость;
- 2) гибридизации — контроль генетического сходства и различий при скрещивании пород;
- 3) биотехнологий — разработка ДНК-тестов для паспортизации и оценки племенной ценности животных.

Таким образом, проведенное исследование расширяет понимание генетических основ фенотипических различий между породами свиней и предоставляет ценные молекулярные маркеры для совершенствования селекционных программ в свиноводстве.

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 за счет финансовой поддержки РНФ (проект № 23-46-00014 «Исследование эволюционных событий и поиск общих геномных компонентов у домашних и диких представителей вида *Sus scrofa* азиатского и европейского происхождения с использованием полногеномного анализа»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liu H. *et al.* Genome-Wide Association Study and F_{st} Analysis Reveal Four Quantitative Trait Loci and Six Candidate Genes for Meat Color in Pigs. *Frontiers in Genetics*. 2022; 13: 768710. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.768710>
2. Hu Z. *et al.* Unveiling the Genetic Secrets of Chinese Indigenous Pigs from Guizhou Province: Diversity, Evolution and Candidate Genes Affecting Pig Coat Color. *Animals*. 2024; 14(5): 699. <https://doi.org/10.3390/ani14050699>
3. Nguyen A.T., Kövér G., Farkas J., Bokor Á., Tóth P., Nagy I. Analysis of genetic variability and population structure of the Mangalica pig breed using pedigree data. *Livestock Science*. 2023; 273: 105265. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105265>
4. Posta J., Szabó P., Komlósi I. Pedigree Analysis of Mangalica Pig Breeds. *Annals of Animal Science*. 2016; 16(3): 701–709. <https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0075>
5. Nguyen A.T., Kövér G., Tóth P., Curik I., Bokor Á., Nagy I. Population Subdivision and Migration Assessment of Mangalica Pig Breeds Based on Pedigree Analysis. *Animals*. 2024; 14(4): 653. <https://doi.org/10.3390/ani14040653>
6. Addo S., Jung L. An insight into the runs of homozygosity distribution and breed differentiation in Mangalitsa pigs. *Frontiers in Genetics*. 2022; 13: 909986. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.909986>
7. Bovo S. *et al.* Whole-genome sequencing of European autochthonous and commercial pig breeds allows the detection of signatures of selection for adaptation of genetic resources to different breeding and production systems. *Genetics Selection Evolution*. 2020; 52: 33. <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00553-7>
8. Tang Z. *et al.* Discovery of selection-driven genetic differences of Duroc, Landrace, and Yorkshire pig breeds by Eigen GWAS and F_{st} analyses. *Animal Genetics*. 2020; 51(4): 531–540. <https://doi.org/10.1111/age.12946>
9. Харзинова В.Р., Зиновьева Н.А. Паттерн генетического разнообразия у свиней локальных и коммерческих пород на основе анализа микросателлитов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020; 24(7): 747–754 (на англ. яз.). <https://doi.org/10.18699/VJ20.669>
10. Yuan H. *et al.* Unraveling the genetic diversity and adaptive traits of laboratory pig breeds within the perspective of whole — genome resequencing. *BMC Genomics*. 2025; 26: 604. <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11790-9>
11. Zhang L. *et al.* Genome-Wide Association Studies and Runs of Homozygosity to Identify Reproduction-Related Genes in Yorkshire Pig Population. *Genes*. 2023; 14(12): 2133. <https://doi.org/10.3390/genes14122133>
12. Zhou S. *et al.* A meta-analysis of genome-wide association studies for average daily gain and lean meat percentage in two Duroc pig populations. *BMC Genomics*. 2021; 22: 12. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07288-1>
13. Moon S. *et al.* A genome-wide scan for signatures of directional selection in domesticated pigs. *BMC Genomics*. 2015; 16: 130. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1330-x>
14. Tong S.-f., Zhu M., Xie R., Li D.-f., Zhang L.-f., Liu Y. Genome-wide detection for runs of homozygosity analysis in three pig breeds from Chinese Taihu Basin and Landrace pigs by SLAF-seq data. *Journal of Integrative Agriculture*. 2022; 21(11): 3293–3301. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.061>

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

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-46-00014 "Investigation of evolutionary events and search for common genomic components in domestic and wild representatives of the species *Sus scrofa* of Asian and European origin using genome-wide analysis").

REFERENCES

1. Liu H. *et al.* Genome-Wide Association Study and F_{st} Analysis Reveal Four Quantitative Trait Loci and Six Candidate Genes for Meat Color in Pigs. *Frontiers in Genetics*. 2022; 13: 768710. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.768710>
2. Hu Z. *et al.* Unveiling the Genetic Secrets of Chinese Indigenous Pigs from Guizhou Province: Diversity, Evolution and Candidate Genes Affecting Pig Coat Color. *Animals*. 2024; 14(5): 699. <https://doi.org/10.3390/ani14050699>
3. Nguyen A.T., Kövér G., Farkas J., Bokor Á., Tóth P., Nagy I. Analysis of genetic variability and population structure of the Mangalica pig breed using pedigree data. *Livestock Science*. 2023; 273: 105265. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105265>
4. Posta J., Szabó P., Komlósi I. Pedigree Analysis of Mangalica Pig Breeds. *Annals of Animal Science*. 2016; 16(3): 701–709. <https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0075>
5. Nguyen A.T., Kövér G., Tóth P., Curik I., Bokor Á., Nagy I. Population Subdivision and Migration Assessment of Mangalica Pig Breeds Based on Pedigree Analysis. *Animals*. 2024; 14(4): 653. <https://doi.org/10.3390/ani14040653>
6. Addo S., Jung L. An insight into the runs of homozygosity distribution and breed differentiation in Mangalitsa pigs. *Frontiers in Genetics*. 2022; 13: 909986. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.909986>
7. Bovo S. *et al.* Whole-genome sequencing of European autochthonous and commercial pig breeds allows the detection of signatures of selection for adaptation of genetic resources to different breeding and production systems. *Genetics Selection Evolution*. 2020; 52: 33. <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00553-7>
8. Tang Z. *et al.* Discovery of selection-driven genetic differences of Duroc, Landrace, and Yorkshire pig breeds by Eigen GWAS and F_{st} analyses. *Animal Genetics*. 2020; 51(4): 531–540. <https://doi.org/10.1111/age.12946>
9. Kharzinova V.R., Zinovieva N.A. The pattern of genetic diversity of different breeds of pigs based on microsatellite analysis. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020; 24(7): 747–754. <https://doi.org/10.18699/VJ20.669>
10. Yuan H. *et al.* Unraveling the genetic diversity and adaptive traits of laboratory pig breeds within the perspective of whole — genome resequencing. *BMC Genomics*. 2025; 26: 604. <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11790-9>
11. Zhang L. *et al.* Genome-Wide Association Studies and Runs of Homozygosity to Identify Reproduction-Related Genes in Yorkshire Pig Population. *Genes*. 2023; 14(12): 2133. <https://doi.org/10.3390/genes14122133>
12. Zhou S. *et al.* A meta-analysis of genome-wide association studies for average daily gain and lean meat percentage in two Duroc pig populations. *BMC Genomics*. 2021; 22: 12. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07288-1>
13. Moon S. *et al.* A genome-wide scan for signatures of directional selection in domesticated pigs. *BMC Genomics*. 2015; 16: 130. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1330-x>
14. Tong S.-f., Zhu M., Xie R., Li D.-f., Zhang L.-f., Liu Y. Genome-wide detection for runs of homozygosity analysis in three pig breeds from Chinese Taihu Basin and Landrace pigs by SLAF-seq data. *Journal of Integrative Agriculture*. 2022; 21(11): 3293–3301. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.061>

15. Wu J. *et al.* Whole-genome *de novo* sequencing reveals genomic variants associated with differences of sex development in SRY negative pigs. *Biology of Sex Differences*. 2024; 15: 68. <https://doi.org/10.1186/s13293-024-00644-w>
16. Long H. *et al.* Identification of alternatively spliced Dab1 and Fyn isoforms in pig. *BMC Neuroscience*. 2011; 12: 17. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-12-17>
17. Fernández A.I. *et al.* Genome-wide linkage analysis of QTL for growth and body composition employing the PorcineSNP60 BeadChip. *BMC Genetics*. 2012; 13: 41. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-41>
18. Kim S. *et al.* Molecular and genetic regulation of pig pancreatic islet cell development. *Development*. 2020; 147(6): dev186213. <https://doi.org/10.1242/dev.186213>
19. Zhang K. *et al.* Multi-Omics Profiling Reveals Se Deficiency–Induced Redox Imbalance, Metabolic Reprogramming, and Inflammation in Pig Muscle. *The Journal of Nutrition*. 2022; 152(5): 1207–1219. <https://doi.org/10.1093/jn/nxac016>
20. Tang X. *et al.* Single-Nucleus RNA-Seq Reveals Spermatogonial Stem Cell Developmental Pattern in Shaziling Pigs. *Biomolecules*. 2024; 14(6): 607. <https://doi.org/10.3390/biom14060607>
21. Uno M., Bono H. Transcriptional Signatures of Domestication Revealed through Meta-Analysis of Pig, Chicken, Wild Boar, and Red Junglefowl Gene Expression Data. *Animals*. 2024; 14(13): 1998. <https://doi.org/10.3390/ani14131998>
22. Óvilo C. *et al.* SNP discovery and association study for growth, fatness and meat quality traits in Iberian crossbred pigs. *Scientific Reports*. 2022; 12: 16361. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20817-0>
23. Do D.N., Strathe A.B., Ostensen T., Jensen J., Mark T., Kadarmideen H.N. Genome-Wide Association Study Reveals Genetic Architecture of Eating Behavior in Pigs and Its Implications for Humans Obesity by Comparative Mapping. *PLoS ONE*. 2013; 8(8): e71509. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071509>
24. Hlongwane N.L., Dzomba E.F., Hadebe K., van der Nest M.A., Pierneef R., Muchadeyi F.C. Identification of Signatures of Positive Selection That Have Shaped the Genomic Landscape of South African Pig Populations. *Animals*. 2024; 14(2): 236. <https://doi.org/10.3390/ani14020236>
25. Hlongwane N.L., Hadebe K., Soma P., Dzomba E.F., Muchadeyi F.C. Genome Wide Assessment of Genetic Variation and Population Distinctiveness of the Pig Family in South Africa. *Frontiers in Genetics*. 2020; 11: 344. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00344>
26. Zappaterra M., Gioiosa S., Chillemi G., Zambonelli P., Davoli R. Muscle transcriptome analysis identifies genes involved in ciliogenesis and the molecular cascade associated with intramuscular fat content in Large White heavy pigs. *PLoS ONE*. 2020; 15(5): e0233372. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233372>
27. Alvarez-Rodriguez M., Martinez C., Wright D., Barranco I., Roca J., Rodriguez-Martinez H. The Transcriptome of Pig Spermatozoa, and Its Role in Fertility. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(5): 1572. <https://doi.org/10.3390/ijms21051572>
28. Chernukha I., Abdelmanova A., Kotenkova E., Kharzinova V., Zinovieva N.A. Assessing Genetic Diversity and Searching for Selection Signatures by Comparison between the Indigenous Livni and Duroc Breeds in Local Livestock of the Central Region of Russia. *Diversity*. 2022; 14(10): 859. <https://doi.org/10.3390/d14100859>
29. Niu M., Zhao Y., Jia Y., Xiang L., Dai X., Chen H. Whole-genome sequencing study to identify candidate markers indicating susceptibility to type 2 diabetes in Bama miniature pigs. *Animal Models and Experimental Medicine*. 2023; 6(4): 283–293. <https://doi.org/10.1002/ame2.12317>
30. Borowiec B.M. *et al.* New Gene Markers Regulating the Process of Vascularization in Pig Preovulatory Oocytes during Growth and Maturation. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*. 2024; 38(4): 2807–2824. <https://doi.org/10.23812/j.biolog.regul.homeost.agents.20243804.219>
31. Xiong H., Zhang Y., Zhao Z., Sha Q. Whole-genome SNP allele frequency differences between Tibetan and Large white pigs reveal genes associated with skeletal muscle growth. *BMC Genomics*. 2024; 25: 588. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10508-7>
15. Wu J. *et al.* Whole-genome *de novo* sequencing reveals genomic variants associated with differences of sex development in SRY negative pigs. *Biology of Sex Differences*. 2024; 15: 68. <https://doi.org/10.1186/s13293-024-00644-w>
16. Long H. *et al.* Identification of alternatively spliced Dab1 and Fyn isoforms in pig. *BMC Neuroscience*. 2011; 12: 17. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-12-17>
17. Fernández A.I. *et al.* Genome-wide linkage analysis of QTL for growth and body composition employing the PorcineSNP60 BeadChip. *BMC Genetics*. 2012; 13: 41. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-41>
18. Kim S. *et al.* Molecular and genetic regulation of pig pancreatic islet cell development. *Development*. 2020; 147(6): dev186213. <https://doi.org/10.1242/dev.186213>
19. Zhang K. *et al.* Multi-Omics Profiling Reveals Se Deficiency–Induced Redox Imbalance, Metabolic Reprogramming, and Inflammation in Pig Muscle. *The Journal of Nutrition*. 2022; 152(5): 1207–1219. <https://doi.org/10.1093/jn/nxac016>
20. Tang X. *et al.* Single-Nucleus RNA-Seq Reveals Spermatogonial Stem Cell Developmental Pattern in Shaziling Pigs. *Biomolecules*. 2024; 14(6): 607. <https://doi.org/10.3390/biom14060607>
21. Uno M., Bono H. Transcriptional Signatures of Domestication Revealed through Meta-Analysis of Pig, Chicken, Wild Boar, and Red Junglefowl Gene Expression Data. *Animals*. 2024; 14(13): 1998. <https://doi.org/10.3390/ani14131998>
22. Óvilo C. *et al.* SNP discovery and association study for growth, fatness and meat quality traits in Iberian crossbred pigs. *Scientific Reports*. 2022; 12: 16361. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20817-0>
23. Do D.N., Strathe A.B., Ostensen T., Jensen J., Mark T., Kadarmideen H.N. Genome-Wide Association Study Reveals Genetic Architecture of Eating Behavior in Pigs and Its Implications for Humans Obesity by Comparative Mapping. *PLoS ONE*. 2013; 8(8): e71509. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071509>
24. Hlongwane N.L., Dzomba E.F., Hadebe K., van der Nest M.A., Pierneef R., Muchadeyi F.C. Identification of Signatures of Positive Selection That Have Shaped the Genomic Landscape of South African Pig Populations. *Animals*. 2024; 14(2): 236. <https://doi.org/10.3390/ani14020236>
25. Hlongwane N.L., Hadebe K., Soma P., Dzomba E.F., Muchadeyi F.C. Genome Wide Assessment of Genetic Variation and Population Distinctiveness of the Pig Family in South Africa. *Frontiers in Genetics*. 2020; 11: 344. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00344>
26. Zappaterra M., Gioiosa S., Chillemi G., Zambonelli P., Davoli R. Muscle transcriptome analysis identifies genes involved in ciliogenesis and the molecular cascade associated with intramuscular fat content in Large White heavy pigs. *PLoS ONE*. 2020; 15(5): e0233372. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233372>
27. Alvarez-Rodriguez M., Martinez C., Wright D., Barranco I., Roca J., Rodriguez-Martinez H. The Transcriptome of Pig Spermatozoa, and Its Role in Fertility. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(5): 1572. <https://doi.org/10.3390/ijms21051572>
28. Chernukha I., Abdelmanova A., Kotenkova E., Kharzinova V., Zinovieva N.A. Assessing Genetic Diversity and Searching for Selection Signatures by Comparison between the Indigenous Livni and Duroc Breeds in Local Livestock of the Central Region of Russia. *Diversity*. 2022; 14(10): 859. <https://doi.org/10.3390/d14100859>
29. Niu M., Zhao Y., Jia Y., Xiang L., Dai X., Chen H. Whole-genome sequencing study to identify candidate markers indicating susceptibility to type 2 diabetes in Bama miniature pigs. *Animal Models and Experimental Medicine*. 2023; 6(4): 283–293. <https://doi.org/10.1002/ame2.12317>
30. Borowiec B.M. *et al.* New Gene Markers Regulating the Process of Vascularization in Pig Preovulatory Oocytes during Growth and Maturation. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*. 2024; 38(4): 2807–2824. <https://doi.org/10.23812/j.biolog.regul.homeost.agents.20243804.219>
31. Xiong H., Zhang Y., Zhao Z., Sha Q. Whole-genome SNP allele frequency differences between Tibetan and Large white pigs reveal genes associated with skeletal muscle growth. *BMC Genomics*. 2024; 25: 588. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10508-7>

32. Bertolini F. *et al.* Signatures of selection analyses reveal genomic differences among three heavy pig breeds that constitute the genetic backbone of a dry-cured ham production system. *Animal*. 2024; 18(11): 101335.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101335>
33. Kolosov A. *et al.* Investigation of the Genetic Architecture of Pigs Subjected to Breeding Intensification. *Genes*. 2022; 13(2): 197.
<https://doi.org/10.3390/genes13020197>
34. Ponsuksili S., Trakooljul N., Basavaraj S., Hadlich F., Murani E., Wimmers K. Epigenome-wide skeletal muscle DNA methylation profiles at the background of distinct metabolic types and ryanodine receptor variation in pigs. *BMC Genomics*. 2019; 20: 492.
<https://doi.org/10.1186/s12864-019-5880-1>
35. Loan H.T.P., Murani E., Maak S., Ponsuksili S., Wimmers K. Novel SNPs of the porcine *TRIP12* are associated with water holding capacity of meat. *Czech Journal of Animal Science*. 2013; 58(11): 525–533.
<https://doi.org/10.17221/7048-cjas>
36. Liu H. *et al.* A Single-Step Genome Wide Association Study on Body Size Traits Using Imputation-Based Whole-Genome Sequence Data in Yorkshire Pigs. *Frontiers in Genetics*. 2021; 12: 629049.
<https://doi.org/10.3389/fgene.2021.629049>
37. Cao Z. *et al.* Arginine Methyltransferase CARM1-Mediated H3R26me2 Is Essential for Morula-to-Blastocyst Transition in Pigs. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2021; 9: 678282.
<https://doi.org/10.3389/fcell.2021.678282>
38. Yang L. *et al.* Mapping and functional characterization of structural variation in 1060 pig genomes. *Genome Biology*. 2024; 25: 116.
<https://doi.org/10.1186/s13059-024-03253-3>
39. Zhang B. *et al.* Mining of candidate genes related to body size in Chinese native pig breeds based on public data. *Scientific Reports*. 2025; 15: 9793.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-88583-3>
40. Zhao Y.X. *et al.* Genome-wide association studies uncover genes associated with litter traits in the pig. *Animal*. 2022; 16(12): 100672.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100672>
41. Yang R. *et al.* Genetic introgression from commercial European pigs to the indigenous Chinese Lijiang breed and associated changes in phenotypes. *Genetics Selection Evolution*. 2024; 56: 24.
<https://doi.org/10.1186/s12711-024-00893-8>
42. Zhu J. *et al.* A systems genetics study of swine illustrates mechanisms underlying human phenotypic traits. *BMC Genomics*. 2015; 16: 88.
<https://doi.org/10.1186/s12864-015-1240-y>
43. Verardo L.L. *et al.* Revealing new candidate genes for reproductive traits in pigs: combining Bayesian GWAS and functional pathways. *Genetics Selection Evolution*. 2016; 48: 9.
<https://doi.org/10.1186/s12711-016-0189-x>
44. Yan Z., Wang P., Yang Q., Gun S. Single-Cell RNA Sequencing Reveals an Atlas of Hezuo Pig Testis Cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(18): 9786.
<https://doi.org/10.3390/ijms25189786>
45. Sironen A., Uimari P., Venhoranta H., Andersson M., Vilkkii J. An exonic insertion within *Tex14* gene causes spermatogenic arrest in pigs. *BMC Genomics*. 2011; 12: 591.
<https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-591>
46. Crespo-Piazuelo D. *et al.* Identification of transcriptional regulatory variants in pig duodenum, liver, and muscle tissues. *GigaScience*. 2022; 12: giad042.
<https://doi.org/10.1093/gigascience/giad042>
47. Ramos-Ibeas P. *et al.* Pluripotency and X chromosome dynamics revealed in pig pre-gastrulating embryos by single cell analysis. *Nature Communications*. 2019; 10: 500.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08387-8>
48. Lee Y.-S., Shin D., Won K.-H., Kim D.C., Lee S.C., Song K.-D. Genome-wide scans for detecting the selection signature of the Jeju-island native pig in Korea. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2020; 33(4): 539–546.
<https://doi.org/10.5713/ajas.19.0026>
49. Palombo V. *et al.* Single-Step Genome Wide Association Study Identifies QTL Signals for Untrimmed and Trimmed Thigh Weight in Italian Crossbred Pigs for Dry-Cured Ham Production. *Animals*. 2021; 11(6): 1612.
<https://doi.org/10.3390/ani11061612>
50. He Y. *et al.* The Association of an SNP in the *EXOC4* Gene and Reproductive Traits Suggests Its Use as a Breeding Marker in Pigs. *Animals*. 2021; 11(2): 521.
<https://doi.org/10.3390/ani11020521>
51. Hernandez S.C., Finlayson H.A., Ashworth C.J., Haley C.S., Archibald A.L. A genome-wide linkage analysis for reproductive traits in F₂ Large White × Meishan cross gilts. *Animal Genetics*. 2014; 45(2): 191–197.
<https://doi.org/10.1111/age.12123>
32. Bertolini F. *et al.* Signatures of selection analyses reveal genomic differences among three heavy pig breeds that constitute the genetic backbone of a dry-cured ham production system. *Animal*. 2024; 18(11): 101335.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101335>
33. Kolosov A. *et al.* Investigation of the Genetic Architecture of Pigs Subjected to Breeding Intensification. *Genes*. 2022; 13(2): 197.
<https://doi.org/10.3390/genes13020197>
34. Ponsuksili S., Trakooljul N., Basavaraj S., Hadlich F., Murani E., Wimmers K. Epigenome-wide skeletal muscle DNA methylation profiles at the background of distinct metabolic types and ryanodine receptor variation in pigs. *BMC Genomics*. 2019; 20: 492.
<https://doi.org/10.1186/s12864-019-5880-1>
35. Loan H.T.P., Murani E., Maak S., Ponsuksili S., Wimmers K. Novel SNPs of the porcine *TRIP12* are associated with water holding capacity of meat. *Czech Journal of Animal Science*. 2013; 58(11): 525–533.
<https://doi.org/10.17221/7048-cjas>
36. Liu H. *et al.* A Single-Step Genome Wide Association Study on Body Size Traits Using Imputation-Based Whole-Genome Sequence Data in Yorkshire Pigs. *Frontiers in Genetics*. 2021; 12: 629049.
<https://doi.org/10.3389/fgene.2021.629049>
37. Cao Z. *et al.* Arginine Methyltransferase CARM1-Mediated H3R26me2 Is Essential for Morula-to-Blastocyst Transition in Pigs. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2021; 9: 678282.
<https://doi.org/10.3389/fcell.2021.678282>
38. Yang L. *et al.* Mapping and functional characterization of structural variation in 1060 pig genomes. *Genome Biology*. 2024; 25: 116.
<https://doi.org/10.1186/s13059-024-03253-3>
39. Zhang B. *et al.* Mining of candidate genes related to body size in Chinese native pig breeds based on public data. *Scientific Reports*. 2025; 15: 9793.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-88583-3>
40. Zhao Y.X. *et al.* Genome-wide association studies uncover genes associated with litter traits in the pig. *Animal*. 2022; 16(12): 100672.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100672>
41. Yang R. *et al.* Genetic introgression from commercial European pigs to the indigenous Chinese Lijiang breed and associated changes in phenotypes. *Genetics Selection Evolution*. 2024; 56: 24.
<https://doi.org/10.1186/s12711-024-00893-8>
42. Zhu J. *et al.* A systems genetics study of swine illustrates mechanisms underlying human phenotypic traits. *BMC Genomics*. 2015; 16: 88.
<https://doi.org/10.1186/s12864-015-1240-y>
43. Verardo L.L. *et al.* Revealing new candidate genes for reproductive traits in pigs: combining Bayesian GWAS and functional pathways. *Genetics Selection Evolution*. 2016; 48: 9.
<https://doi.org/10.1186/s12711-016-0189-x>
44. Yan Z., Wang P., Yang Q., Gun S. Single-Cell RNA Sequencing Reveals an Atlas of Hezuo Pig Testis Cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(18): 9786.
<https://doi.org/10.3390/ijms25189786>
45. Sironen A., Uimari P., Venhoranta H., Andersson M., Vilkkii J. An exonic insertion within *Tex14* gene causes spermatogenic arrest in pigs. *BMC Genomics*. 2011; 12: 591.
<https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-591>
46. Crespo-Piazuelo D. *et al.* Identification of transcriptional regulatory variants in pig duodenum, liver, and muscle tissues. *GigaScience*. 2022; 12: giad042.
<https://doi.org/10.1093/gigascience/giad042>
47. Ramos-Ibeas P. *et al.* Pluripotency and X chromosome dynamics revealed in pig pre-gastrulating embryos by single cell analysis. *Nature Communications*. 2019; 10: 500.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08387-8>
48. Lee Y.-S., Shin D., Won K.-H., Kim D.C., Lee S.C., Song K.-D. Genome-wide scans for detecting the selection signature of the Jeju-island native pig in Korea. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2020; 33(4): 539–546.
<https://doi.org/10.5713/ajas.19.0026>
49. Palombo V. *et al.* Single-Step Genome Wide Association Study Identifies QTL Signals for Untrimmed and Trimmed Thigh Weight in Italian Crossbred Pigs for Dry-Cured Ham Production. *Animals*. 2021; 11(6): 1612.
<https://doi.org/10.3390/ani11061612>
50. He Y. *et al.* The Association of an SNP in the *EXOC4* Gene and Reproductive Traits Suggests Its Use as a Breeding Marker in Pigs. *Animals*. 2021; 11(2): 521.
<https://doi.org/10.3390/ani11020521>
51. Hernandez S.C., Finlayson H.A., Ashworth C.J., Haley C.S., Archibald A.L. A genome-wide linkage analysis for reproductive traits in F₂ Large White × Meishan cross gilts. *Animal Genetics*. 2014; 45(2): 191–197.
<https://doi.org/10.1111/age.12123>

52. Tribout T. *et al.* Detection of quantitative trait loci for reproduction and production traits in Large White and French Landrace pig populations. *Genetics Selection Evolution*. 2008; 40: 61. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-40-1-61>
53. Duijvesteijn N., Veltmaat J.M., Knol E.F., Harlizius B. High-resolution association mapping of number of teats in pigs reveals regions controlling vertebral development. *BMC Genomics*. 2014; 15: 542. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-542>
54. Dervishi E. *et al.* GWAS and genetic and phenotypic correlations of plasma metabolites with complete blood count traits in healthy young pigs reveal implications for pig immune response. *Frontiers in Molecular Biosciences*. 2023; 10: 1140375. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2023.1140375>
55. Wei C. *et al.* Integration of non-additive genome-wide association study with a multi-tissue transcriptome analysis of growth and carcass traits in Duroc pigs. *Animal*. 2023; 17(6): 100817. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100817>
56. Muñoz M. *et al.* Identification of Candidate Genes and Regulatory Factors Underlying Intramuscular Fat Content Through Longissimus Dorsi Transcriptome Analyses in Heavy Iberian Pigs. *Frontiers in Genetics*. 2018; 9: 608. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00608>
57. Raschetti M., Rignanesi D., Pagnacco G., Castiglioni B., Chessa S. Polymorphisms in swine candidate genes for meat quality detected by PCR-SSCP. *Italian Journal of Animal Science*. 2009; 8(S2): 129–131. <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s2.129>
58. Raschetti M., Castiglioni B., Caroli A., Guiatti D., Pagnacco G., Chessa S. SNP identification in swine candidate genes for meat quality. *Livestock Science*. 2013; 155(2–3): 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.008>
59. Wang X. *et al.* GWAS of Reproductive Traits in Large White Pigs on Chip and Imputed Whole-Genome Sequencing Data. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(21): 13338. <https://doi.org/10.3390/ijms232113338>
60. Park J. Genome-wide association study to reveal new candidate genes using single-step approaches for productive traits of Yorkshire pig in Korea. *Animal Bioscience*. 2024; 37(3): 451–460. <https://doi.org/10.5713/ab.23.0255>
61. Bakoev S. *et al.* Survey of SNPs Associated with Total Number Born and Total Number Born Alive in Pig. *Genes*. 2020; 11(5): 491. <https://doi.org/10.3390/genes11050491>
62. Wang Y. *et al.* Genome-wide association study for reproductive traits in a Large White pig population. *Animal Genetics*. 2018; 49(2): 127–131. <https://doi.org/10.1111/age.12638>
63. Ding R. *et al.* Genome-wide association studies reveals polygenic genetic architecture of litter traits in Duroc pigs. *Theriogenology*. 2021; 173: 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.08.012>
64. Gao G. *et al.* Genome-Wide Association Study of Meat Quality Traits in a Three-Way Crossbred Commercial Pig Population. *Frontiers in Genetics*. 2021; 12: 614087. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.614087>
65. Tinh N.H. *et al.* Novel genotyping assay for a 212-kb deletion from the *BBS9* gene, and frequency of the allele in pig populations in Vietnam. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2024; 36(6): 847–851. <https://doi.org/10.1177/10406387241282082>
66. Bovo S. *et al.* Exploiting single-marker and haplotype-based genome-wide association studies to identify QTL for the number of teats in Italian Duroc pigs. *Livestock Science*. 2022; 257: 104849. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104849>
67. Johnson C., Drgon T., McMahon F.J., Uhl G.R. Convergent genome wide association results for bipolar disorder and substance dependence. *American Journal of Medical Genetics Part B: Neuropsychiatric Genetics*. 2009; 150B(2): 182–190. <https://doi.org/10.1002/ajmg.b.30900>
68. Qi F. *et al.* Genome-wide characterization of structure variations in the Xiang pig for genetic resistance to African swine fever. *Virulence*. 2024; 15(1): 2382762. <https://doi.org/10.1080/21505594.2024.2382762>
69. Gao H. *et al.* Integrative analysis of genome-wide association study and transcriptomics to identify potential candidate genes influencing drip loss in Beijing Black pigs. *Animal Research and One Health*. 2024; 2(4): 446–457. <https://doi.org/10.1002/aro2.32>
70. Li F. *et al.* Transcription Factor *SATB2* Regulates Skeletal Muscle Cell Proliferation and Migration via *HDAC4* in Pigs. *Genes*. 2024; 15(1): 65. <https://doi.org/10.3390/genes15010065>
52. Tribout T. *et al.* Detection of quantitative trait loci for reproduction and production traits in Large White and French Landrace pig populations. *Genetics Selection Evolution*. 2008; 40: 61. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-40-1-61>
53. Duijvesteijn N., Veltmaat J.M., Knol E.F., Harlizius B. High-resolution association mapping of number of teats in pigs reveals regions controlling vertebral development. *BMC Genomics*. 2014; 15: 542. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-542>
54. Dervishi E. *et al.* GWAS and genetic and phenotypic correlations of plasma metabolites with complete blood count traits in healthy young pigs reveal implications for pig immune response. *Frontiers in Molecular Biosciences*. 2023; 10: 1140375. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2023.1140375>
55. Wei C. *et al.* Integration of non-additive genome-wide association study with a multi-tissue transcriptome analysis of growth and carcass traits in Duroc pigs. *Animal*. 2023; 17(6): 100817. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100817>
56. Muñoz M. *et al.* Identification of Candidate Genes and Regulatory Factors Underlying Intramuscular Fat Content Through Longissimus Dorsi Transcriptome Analyses in Heavy Iberian Pigs. *Frontiers in Genetics*. 2018; 9: 608. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00608>
57. Raschetti M., Rignanesi D., Pagnacco G., Castiglioni B., Chessa S. Polymorphisms in swine candidate genes for meat quality detected by PCR-SSCP. *Italian Journal of Animal Science*. 2009; 8(S2): 129–131. <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s2.129>
58. Raschetti M., Castiglioni B., Caroli A., Guiatti D., Pagnacco G., Chessa S. SNP identification in swine candidate genes for meat quality. *Livestock Science*. 2013; 155(2–3): 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.008>
59. Wang X. *et al.* GWAS of Reproductive Traits in Large White Pigs on Chip and Imputed Whole-Genome Sequencing Data. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(21): 13338. <https://doi.org/10.3390/ijms232113338>
60. Park J. Genome-wide association study to reveal new candidate genes using single-step approaches for productive traits of Yorkshire pig in Korea. *Animal Bioscience*. 2024; 37(3): 451–460. <https://doi.org/10.5713/ab.23.0255>
61. Bakoev S. *et al.* Survey of SNPs Associated with Total Number Born and Total Number Born Alive in Pig. *Genes*. 2020; 11(5): 491. <https://doi.org/10.3390/genes11050491>
62. Wang Y. *et al.* Genome-wide association study for reproductive traits in a Large White pig population. *Animal Genetics*. 2018; 49(2): 127–131. <https://doi.org/10.1111/age.12638>
63. Ding R. *et al.* Genome-wide association studies reveals polygenic genetic architecture of litter traits in Duroc pigs. *Theriogenology*. 2021; 173: 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.08.012>
64. Gao G. *et al.* Genome-Wide Association Study of Meat Quality Traits in a Three-Way Crossbred Commercial Pig Population. *Frontiers in Genetics*. 2021; 12: 614087. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.614087>
65. Tinh N.H. *et al.* Novel genotyping assay for a 212-kb deletion from the *BBS9* gene, and frequency of the allele in pig populations in Vietnam. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. 2024; 36(6): 847–851. <https://doi.org/10.1177/10406387241282082>
66. Bovo S. *et al.* Exploiting single-marker and haplotype-based genome-wide association studies to identify QTL for the number of teats in Italian Duroc pigs. *Livestock Science*. 2022; 257: 104849. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104849>
67. Johnson C., Drgon T., McMahon F.J., Uhl G.R. Convergent genome wide association results for bipolar disorder and substance dependence. *American Journal of Medical Genetics Part B: Neuropsychiatric Genetics*. 2009; 150B(2): 182–190. <https://doi.org/10.1002/ajmg.b.30900>
68. Qi F. *et al.* Genome-wide characterization of structure variations in the Xiang pig for genetic resistance to African swine fever. *Virulence*. 2024; 15(1): 2382762. <https://doi.org/10.1080/21505594.2024.2382762>
69. Gao H. *et al.* Integrative analysis of genome-wide association study and transcriptomics to identify potential candidate genes influencing drip loss in Beijing Black pigs. *Animal Research and One Health*. 2024; 2(4): 446–457. <https://doi.org/10.1002/aro2.32>
70. Li F. *et al.* Transcription Factor *SATB2* Regulates Skeletal Muscle Cell Proliferation and Migration via *HDAC4* in Pigs. *Genes*. 2024; 15(1): 65. <https://doi.org/10.3390/genes15010065>

ОБ АВТОРАХ

Анна Александровна Белоус¹

кандидат биологических наук, доцент, директор
belousa663@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7533-4281>

Вероника Руслановна Харзинова²

кандидат биологических наук, ведущий научный
сотрудник, заведующая лабораторией ДНК-технологий
в животноводстве
veronika0784@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8067-0404>

Надежда Александровна Чурбакова²

аспирант, младший научный сотрудник
nadushik95@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-1061-2715>

Наталья Анатольевна Зиновьева²

доктор биологических наук, профессор, академик
Российской академии наук, директор
n_zinovieva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4017-6863>

¹Всероссийский научно-исследовательский институт
интегрированного рыбоводства — филиал Федерального
исследовательского центра животноводства ВИЖ
им. академика Л.К. Эрнста,
пос. им. Воровского, ул. им. Сергеева, 24, Ногинский р-н,
Московская обл., 142460, Россия

²Федеральный исследовательский центр
животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста,
пос. Дубровицы, 60, г. о. Подольск, Московская обл.,
142132, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Anna Alexandrovna Belous¹

Candidate of Biological Sciences, Docent, Director
belousa663@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7533-4281>

Veronika Ruslanovna Kharzinova²

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 Churbakova²

Graduate Student, Junior Research
nadushik95@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-1061-2715>

Natalia Anatolyevna Zinovieva²

Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician
of the Russian Academy of Sciences, Director
n_zinovieva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4017-6863>

¹All-Russian Research Institute of Integrated Fish Farming —
branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry,

24 Sergeev Str., Vorovsky village, Noginsky district,
Moscow region, 142460, Russia

²L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,

60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District,
Moscow Region, 142132, 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

МПА:

Кафедра отраслей животноводства и комбикормового производства

Завкафедрой профессор
Щербакова
Ольга Евгеньевна
тел/факс (495) 959-71-06
scherbakova@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 636.2.034: 575.174.015.3

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132

Е.И. Тарасова ✉

Е.А. Сизова

Е.В. Яушева

С.В. Лебедев

Федеральный научный центр
биологических систем
и агротехнологий Российской
академии наук, Оренбург, Россия

✉ ekaterina45828@mail.ru

Поступила в редакцию: 16.04.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Тарасова Е.И., Сизова Е.А., Яушева Е.В.,
Лебедев С.В.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132

Ekaterina I. Tarasova ✉

Elena A. Sizova

Elena V. Yausheva

Svyatoslav V. Lebedev

Federal Research Centre of Biological
Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russia

✉ ekaterina45828@mail.ru

Received by the editorial office: 16.04.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Tarasova E.I., Sizova E.A., Yausheva E.V.,
Lebedev S.V.

Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементным составом сыворотки крови коров красной степной породы

РЕЗЮМЕ

В последние годы изучение генетических факторов, влияющих на иммунный ответ, устойчивость к заболеваниям и продуктивность животных, привлекает значительное внимание селекционеров. Одним из таких факторов является толл-подобный рецептор 4 (TLR4), который играет ключевую роль в иммунном ответе. Рецептор реагирует на липополисахаридные компоненты бактериальной клеточной стенки. У крупного рогатого скота идентифицированы 10 функциональных TLR (от TLR1 до TLR10), каждый из которых эволюционировал для распознавания специфических патоген-ассоциированных молекулярных паттернов (PAMP). Генетические полиморфизмы в генах TLR могут влиять на обмен веществ, связанный с усвоением и распределением макро- и микроэлементов, а также определять различия в их содержании в тканях и сыворотке крови. Цель данного исследования — изучение влияния полиморфизма rs8193046 гена TLR4 на содержание лейкоцитов и элементный состав сыворотки крови коров красной степной породы.

Впервые была выявлена связь аллельных вариантов гена TLR4 с содержанием элементов в сыворотке крови и показателями иммунитета у дойных коров этой породы. Генотип GG гена TLR4 был ассоциирован с более высоким содержанием макроэлементов, таких как кальций и фосфор, а также с более низким уровнем токсичных микроэлементов, включая кадмий. Наличие носителей альтернативных аллелей в стаде красной степной породы открывает возможности для селекции, направленной на повышение резистентности к инфекционным заболеваниям.

Ключевые слова: TLR4, rs8193046, элементный состав, сыворотка крови, молочные коровы, красный степной скот

Для цитирования: Тарасова Е.И., Сизова Е.А., Яушева Е.В., Лебедев С.В. Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементным составом сыворотки крови коров красной степной породы. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 121–132.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132>

Association of the rs8193046 polymorphism of the TLR4 gene with the elemental composition of the blood serum of red steppe cows

ABSTRACT

In recent years, the study of genetic factors affecting the immune response, disease resistance and productivity of animals has attracted considerable attention from breeders. One of these factors is the toll-like receptor 4 (TLR4), which plays a key role in the immune response. The receptor responds to lipopolysaccharide components of the bacterial cell wall. Ten functional TLRs (TLR1 to TLR10) have been identified in cattle, each of which has evolved to recognize specific pathogen-associated molecular patterns (PAMPs). Genetic polymorphisms in TLR genes can affect metabolism associated with the absorption and distribution of macro- and microelements, as well as determine differences in their content in tissues and blood serum.

The purpose of this study is to study the effect of the rs8193046 polymorphism of the TLR4 gene on the content of leukocytes and the elemental composition of the blood serum of cows of the red steppe breed.

For the first time, a connection was found between allelic variants of the TLR4 gene and the content of elements in the blood serum and immunity indices in dairy cows of this breed. The GG genotype of the TLR4 gene was associated with a higher content of macroelements, such as calcium and phosphorus, as well as with a lower level of toxic microelements, including cadmium. The presence of carriers of alternative alleles in the herd of the Red Steppe breed opens up opportunities for selection aimed at increasing resistance to infectious diseases.

Key words: TLR4, rs8193046, elemental composition, blood serum, dairy cows, red steppe cattle

For citation: Tarasova E.I., Sizova E.A., Yausheva E.V., Lebedev S.V. Association of the rs8193046 polymorphism of the TLR4 gene with the elemental composition of the blood serum of red steppe cows. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 121–132 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-121-132>

Введение/Introduction

Молочная продуктивность и здоровье крупного рогатого скота являются ключевыми факторами, определяющими экономическую эффективность животноводческих хозяйств [1–4].

В последние годы значительное внимание уделяется изучению генетических факторов, влияющих на иммунный ответ, устойчивость к заболеваниям [5–8], уровень продуктивности и качество продукции животного происхождения [9–11]. Один из таких факторов — ген TLR4 [12, 13], который кодирует рецептор, играющий жизненно важную роль в иммунном ответе и реагирующий на липополисахаридные компоненты бактериальной клеточной стенки [14].

Полиморфизм rs8193046 гена TLR4 у крупного рогатого скота представляет собой изменение в последовательности ДНК, которое происходит в некодирующей области гена [15]. Этот полиморфизм рекомендован Международным обществом по генетике животных (ISAG) для использования в программах отбора, что подчеркивает его значимость для улучшения генетических характеристик и устойчивости животных к заболеваниям.

Ген TLR4 локализован на хромосоме 8. Исследуемый полиморфизм находится в интроне, поэтому его влияние на биологические функции организма животных вызывает особый интерес и трудности в изучении. Для того чтобы точно определить, как конкретно полиморфизм rs8193046 влияет на функцию гена TLR4 и необходимы дополнительные молекулярные исследования, включая функциональный анализ, который мог бы оценить изменения в экспрессии гена, сплайсинге мРНК и других аспектах генной активности.

Толл-подобные рецепторы (TLR) представляют собой структурно консервативный класс трансмембранных рецепторов распознавания образов I типа, которые могут различать широкий спектр патоген-ассоциированных молекулярных паттернов (PAMP) [16]. У крупного рогатого скота были идентифицированы и картированы 10 функциональных TLR (от TLR1 до TLR10), причем каждый TLR эволюционировал для распознавания определенных PAMP [17]. Полиморфизм TLR4 связан не только с устойчивостью или восприимчивостью к болезням, таким как мастит или инфекционный кератоконъюнктивит, но и с различными характеристиками молочной продуктивности, количеством соматических клеток, сохранением лактации крупного рогатого скота и легкостью отела [18–20].

TLR4 играет ключевую роль в распознавании патогенов и активации врожденного иммунного ответа [21]. Изменения в регуляции экспрессии этого гена могут влиять на эффективность иммунного ответа коров на инфекции. Здоровье иммунной системы непосредственно связано с продуктивностью сельскохозяйственных животных. Например, здоровье вымени и восприимчивость к маститу определяют количество и качество молока у молочных коров [22, 23].

Генетические полиморфизмы могут оказывать влияние на обмен веществ, связанный с усвоением, транспортировкой и запасом макро- и микроэлементов [24]. Генетические вариации в ферментах, участвующих в метаболизме минералов, могут определять различия в их содержании в тканях и сыворотке крови [25]. Породные особенности животных детерминируют различную генетическую предрасположенность к накоплению конкретных элементов [26]. Например, некоторые породы скота эффективнее усваивают определенные минералы из корма или отличаются метаболическим путем, что влияет на их уровень в организме [27].

Существуют сложные взаимосвязи между определенными микроэлементами, иммунной функцией и устойчивостью к болезням у крупного рогатого скота [28, 29]. Некоторые микроэлементы могут оказывать влияние на компоненты врожденного иммунитета, в связи с этим их можно рассматривать как важные регуляторы TLR, поскольку они обладают иммуномодулирующими функциями [30–32]. Недостаток макро- и микроэлементов может ослабить врожденный иммунитет и повысить восприимчивость к патогенам.

Воспалительные и инфекционные заболевания крупного рогатого скота молочного направления являются наиболее часто встречающимися. Оказывая негативное влияние на благополучие животных, они сопровождаются значительными экономическими потерями для производства [33–35]. Поэтому всё больше исследований сосредоточены на поиске вариаций генов, контролирующих иммунный ответ и восприимчивость к инфекциям, и их связи с различными нарушениями физического состояния животных [36, 37].

Цель данного исследования — изучение влияния полиморфизма rs8193046 гена TLR4 на содержание лейкоцитов и элементный состав сыворотки крови коров красной степной породы.

Авторы предполагают, что различия в элементном составе могут быть связаны с вариациями гена TLR4 и, следовательно, обуславливают различную устойчивость к заболеваниям и продуктивность.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование проводили на физиологически здоровых коровах ($n = 100$) красной степной породы, содержащихся в Оренбургской области Российской Федерации.

Живая масса животных в период отбора составляла $450 \pm 15,6$ кг, возраст 4–5 лет, вторая стадия лактации (100–200 дней).

Эксперимент проводили в весенний сезон 2024 года — стойловый период выращивания.

Отмечали 100%-ную поедаемость кормов.

Данные о рационе исследуемых животных представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав рационов животных в стойловый период выращивания

Table 1. The composition of animal diets during the stall-rearing period

Состав	Количество на одну голову в сутки
Сено бобово-злаковое, кг	5
Сенаж разнотравный, кг	6,5
Корнеплоды (свекла кормовая)	8
Силос кукурузный, кг	13
Концентраты, кг	5
Соль поваренная, г	92
Динатрийфосфат, г	45
Премикс, г	45
В рациионе содержатся:	
ЭКЕ	14,9
Обменная энергия, МДж	152,2
Сухое вещество, кг	15,2
Сырой протеин, г	1998
Переваримый протеин, г	1301,2
Сырая клетчатка, г	3671,8
Крахмал, г	1900,8
Сахар, г	905,4
Сырой жир, г	410,4

Элементный состав воды и рационов питания животных представлен в таблице 2.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов, таких как:

✓ Модельный закон Межпарламентской ассамблеи государств — участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными»¹,

✓ Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009².

Лабораторные исследования проведены в Центре коллективного пользования биологических систем и агротехнологий РАН³.

Для исследований использовали цельную кровь, отобранную из хвостовой вены в пробирки Vacuette с активатором свертывания крови (Greiner Bio-One International AG, Австрия).

Для генетических и гематологических исследований кровь отбирали в пробирки Vacuette с антикоагулянтом K2-ЭДТА (Greiner Bio-One International AG, Австрия).

Определение концентрации минеральных элементов в образцах сыворотки крови проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием масс-спектрометра Agilent 7900 (Agilent Technologies, США).

Таблица 2. Элементный состав воды и рационов, мг/кг
Table 2. Elemental composition of water and diets, mg/kg

Элемент	Вода	Рацион
Li	0,009 ± 0,0006	0,0004 ± 0,00002
Be	0	0,004 ± 0,0001
B	0,04 ± 0,002	8,39 ± 1,1
Na	0	339 ± 18
Mg	36 ± 2	1702 ± 90
Al	0	343,6 ± 1,4
P	0	1444 ± 62
K	2 ± 0	9351 ± 449
Ca	56 ± 3	2351 ± 106
Mn	0,0003 ± 0,0002	19,4 ± 1,05
Co	0,0001 ± 0,00001	0,12 ± 0,001
Ni	0,0008 ± 0,00001	3,422 ± 0,27
Cu	0,001 ± 0,0002	4,42 ± 0,17
Se	0,001 ± 0,0003	3,57 ± 0,98
Br	0,23 ± 0,01	22,4 ± 2,5
Sr	0,47 ± 0,02	28,8 ± 1,5
Mo	0,0002 ± 0,000001	4,37 ± 0,18
Ag	0	1,78 ± 0,48
Cd	0	0,14 ± 0,01
Sn	0	0,06 ± 0,002
Sb	0,0001 ± 0,00001	0,06 ± 0,003
I	0,0034 ± 0,0002	0,24 ± 0,01
Ba	0,0006 ± 0,000002	14,8 ± 1,48
Hg	0	0,15 ± 0,001
Pb	0	0,27 ± 0,01
Bi	0	0,002 ± 0,0003
Cr	0,00013 ± 0,00001	2,67 ± 0,28
Fe	0,0005 ± 0,00001	156,5 ± 0,32
Zn	0,0107 ± 0,0009	10,7 ± 0,6
As	0,005 ± 0,0003	2,7 ± 0,28

Морфологические показатели крови исследовали на анализаторе URIT-2900 Vet Plus (URIT Medical Electronics Co., Китай).

Выделение ДНК проводили из цельной крови с использованием набора реагентов «М-сорб кровь» («Синтол», Россия).

Контроль качества выделенной ДНК проводили на флуориметре Qubit 4.0 с применением набора Qubit dsDNA BR Assay (Invitrogen, США). Генотипирование аллельных вариантов SNP rs8193046 осуществляли методом ПЦР в режиме реального времени. Каждый образец амплифицировали с использованием пары праймеров и двух зондов, несущих «гаситель» на 3'-конце и разные флуоресцентные красители на 5'-конце («Синтол», Россия).

Дизайн праймеров проводили с помощью онлайн-инструмента BLAST NCBI⁴.

¹ Модельный закон об обращении с животными. Принят 31.10.2007 Постановлением № 29-17 на 29-м пленарном заседании МПА СНГ. Информационный бюллетень МПА. 2011; 49: 401–420.

² ГОСТ Р 53434-2009 Принципы надлежащей лабораторной практики.

³ <https://xn----btbzumgw.xn--p1ai/>

⁴ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>

Последовательность праймеров и зондов представлена в таблице 3.

Полимеразную цепную реакцию проводили на амплификаторе Real-time CFX96 Touch (BioRad, США). ПЦР проводили в следующих условиях: предварительная денатурация при 95 °С в течение 180 с., затем 40 циклов, включающих денатурацию при 95 °С в течение 15 с., отжиг праймеров и элонгацию при 63 °С в течение 40 с. Детекцию флуоресценции проводили на стадии элонгации по каналам FAM и HEX.

Обработку полученных данных проводили с использованием методов вариационной статистики с применением статистического пакета Statistica 10 (StatSoft Inc., США).

Гипотезу о принадлежности данных нормальному распределению проверяли с помощью непараметрических процедур обработки статистических совокупностей U-критерия Манна — Уитни. Полученные данные представлены в виде медианы (Me) и 25–75-го квартилей (Q_{25} – Q_{75}). Критическое значение уровня статистической значимости при проверке нулевых гипотез принимали равным 0,05.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

По результатам исследования однонуклеотидного полиморфизма rs8193046 гена *TLR4* коров (n = 100) красной степной породы распределяли по группам согласно их генотипу: носители генотипа AA, гетерозиготные животные AG и гомозиготные животные по мутантному аллелю GG.

Преобладающим вариантом гена *TLR4* оказался генотип GG и был обнаружен у 67% особей, гетерозигот с генотипом AG выявлено 23%, генотип AA имели 10% исследуемых животных.

Частота A-аллеля составляла 0,215, встречаемость G-аллеля достигала 0,785 (рис. 1).

Полиморфизмы в гене *TLR4* могут изменять способность рецептора распознавать патогены и активировать сигнальные пути, такие как транскрипционный ядерный фактор NF- κ B, что может влиять на продукцию цитокинов и, следовательно, на рекрутирование и активацию различных типов лейкоцитов [38]. Как сообщалось ранее, животные с генотипом GG более устойчивы к инфекциям, что указывает на более эффективный иммунный ответ. В настоящем исследовании полиморфизм гена *TLR4* отражался на составе лейкоцитов исследуемых животных.

По результатам клинического анализа крови коров красной степной породы с различными полиморфными вариантами гена *TLR4* носители генотипа AG характеризовались наиболее высоким содержанием лейкоцитов в крови, в то время как группы с генотипами GG и AA уступали по содержанию белых кровяных телец на 18,3% и 12,5% соответственно. В структуре лейкоцитов доминирующее положение занимали гранулоциты (рис. 2), причем у гетерозиготных животных их

Таблица 3. Последовательность праймеров и зондов для оценки SNP rs8193046 *TLR4* коров красной степной породы

Table 3. Primer and probe sequences for evaluation of SNP rs8193046 *TLR4* of Red Steppe cows

Праймеры	F:AGAGGAGAGTTGCTTGAAGTC
	R:TTGGTTGATATGGGGATGTTGT
Зонды	(FAM)-aggaagacaccAcatctaatatct-(RTQ1)
	(R6G)-agacaccGcatctaatatctaatca-(BHQ2)

Рис. 1. Результат амплификации по пороговому циклу rs8193046 гена *TLR4*: канал HEX — аллель A, канал FAM — аллель G

Fig. 1. Result of threshold cycle amplification of rs8193046 of the *TLR4* gene: HEX channel is the A allele, FAM channel is the G allele

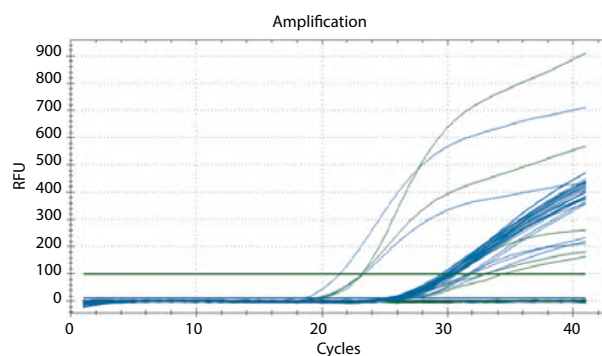
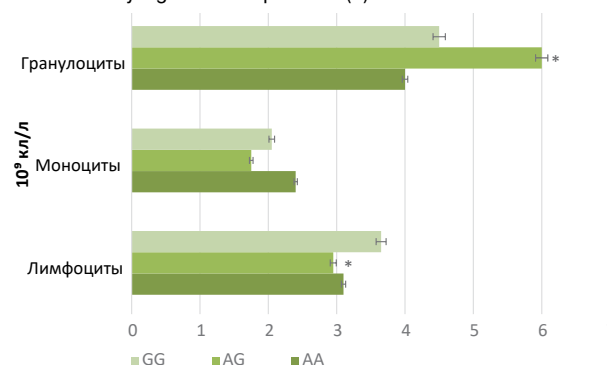


Рис. 2. Содержание типов лейкоцитов в крови коров красной степной породы с различными генотипами *TLR4* в 10^9 кл./л. Различия между группами с генотипами GG и AG по сравнению с группой с генотипом AA статистически значимы при $p < 0,05$ (*)

Fig. 2. The content of leukocyte types in the blood of cows of the Red Steppe breed with different *TLR4* genotypes in 10^9 cells/l. Differences between groups with the GG and AG genotypes compared to the group with the AA genotype are statistically significant at $p < 0.05$ (*)



доля достигала 55,6%, тогда как в группах носителей генотипов GG и AA их содержание составляло 41,3% и 42,4% от общего числа соответственно.

Таким образом, полиморфизм rs8193046 ассоциирован с различиями в количестве лейкоцитов в крови коров красной степной породы, что, возможно, может быть следствием уровня экспрессии *TLR4* у носителей разных вариантов гена. Так, повышенное содержание лейкоцитов у гетерозиготного генотипа (AG) сопровождается более активным иммунным ответом, что, вероятно, обусловлено оптимальным уровнем экспрессии гена.

Показатель количественного содержания гранулоцитов у коров с генотипом AG был выше на 33,3% и 50,0% ($p < 0,05$) относительно групп с GG и AA вариантами гена соответственно, что свидетельствует о более активном врожденном иммунном ответе. Гранулоциты, включая нейтрофилы, играют ключевую роль в раннем ответе на инфекцию [39].

Существует врожденный иммунный ответ, который обеспечивает быстрые реакции на патогены, такие как активация гранулоцитов (нейтрофилов, эозинофилов и базофилов) через TLR4. Этот ответ является первой линией защиты и неспецифичен, а также адаптивный иммунный ответ, который включает более медленные, но специфические реакции, такие как активация лимфоцитов (Т- и В-клеток), обеспечивающие долгосрочную иммунную память [40].

Более низкое содержание лимфоцитов у гетерозиготных животных подтверждает сдвиг в сторону врожденного иммунного ответа, в то время как у носителей генотипов GG и AA более выражен адаптивный иммунный ответ. Таким образом, повышенная доля гранулоцитов у гетерозиготных животных, вероятнее всего, опосредована большей продукцией провоспалительных цитокинов. Следовательно, можно предположить, что генетические особенности животных по гену TLR4 могут влиять на продукцию цитокинов и хемокинов, которые регулируют миграцию и активацию лейкоцитов.

Наиболее низкое содержание лимфоцитов наблюдали в группе гетерозиготных животных, составляющее 27,0% от общего числа лейкоцитов, а наивысшее зафиксировано в группе гомозиготных по мутантному G-аллелю с долей 38,2% в лейкоцитарной формуле коров красной степной породы. Статистически значимые различия количественного содержания лимфоцитов были получены между группами с генотипом GG и AG, которые составили 23,7% ($p < 0,05$).

Повышенное количество гранулоцитов и сниженное количество лимфоцитов у гетерозиготных животных (AG) могут быть связаны с тем, что один референсный аллель (A) обеспечивает достаточную функцию TLR4 для активации врожденного иммунного ответа. Более низкий уровень лимфоцитов у гетерозиготных животных может указывать на то, что врожденный иммунный ответ является доминирующим, в связи с чем необходимость в активации адаптивного иммунного ответа снижена [41].

У животных с генотипом AA наблюдали сбалансированный иммунный ответ с оптимальным уровнем гранулоцитов и лимфоцитов, что соответствует нормальной функции рецептора TLR4. У носителей варианта GG проявляются компенсаторные механизмы, усиливающие адаптивный иммунный ответ, что могло бы объяснить повышенную устойчивость к инфекциям. Эти механизмы включают активацию лимфоцитов и продукцию

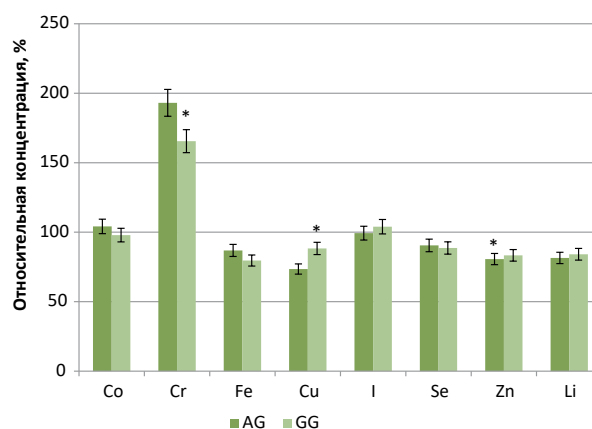
антител, компенсируя изменения во врожденном иммунном ответе за счет усиления адаптивной иммунной реакции, что сопровождается увеличением количества лимфоцитов (Т- и В-клеток) [42].

В результате изучения элементного состава сыворотки крови коров красной степной породы выявлены следующие тенденции. Достоверные различия между AA-генотипом и носителями мутантного G-аллеля были зарегистрированы по концентрации большинства эссенциальных микроэлементов. Наличие G-аллеля ассоциировано с более высокими значениями Cr в сыворотке крови животных (рис. 3). Так, у коров с генотипом GG гена TLR4 концентрация Cr оказалась достоверно выше — на 65,51% ($p = 0,031$), а у гетерозиготных особей AG — на 93,1% по сравнению с группой AA. Содержание остальных изученных эссенциальных микроэлементов у носителей мутантного аллеля в основном уступало группе с референсным генотипом. Так, уровень Cu в группе с GG-вариантом был ниже на 11,68% ($p = 0,039$) по сравнению с животными без мутации, а разница с гетерозиготной группой составляла 26,49% в пользу AA-генотипа. По концентрации Zn различия между животными с вариантом AA гена TLR4 и генотипом GG составляли 16,65%, а по сравнению с гетерозиготной группой установлено достоверное превышение содержания элемента на 19,33% ($p = 0,016$). Схожую тенденцию наблюдали для Fe и Li.

По содержанию условно-эссенциальных элементов в сыворотке крови статистически значимых различий между носителями разных вариантов гена не выявлено. Однако отмечали тенденцию более низкого уровня V в группах с мутантным аллелем по сравнению с генотипом AA.

Рис. 3. Относительная разница концентрации эссенциальных микроэлементов в сыворотке крови коров красной степной породы с генотипами GG и AG гена TLR4 по сравнению с генотипом AA (100%), %. Различия между группами с генотипами GG и AG по сравнению с группой с генотипом AA статистически значимы при $p < 0,05$ (*)

Fig. 3. Relative difference in the concentration of essential microelements in the blood serum of Red Steppe cows with the GG and AG genotypes of the TLR4 gene compared to the AA genotype (100%), %. Differences between groups with the GG and AG genotypes compared to the group with the AA genotype are statistically significant at $p < 0.05$ (*)



Так, превосходство AA-особей варьировало в пределах 11,53–21,15% при минимальном значении у гомозиготных коров.

В категории потенциально токсичных и токсичных элементов достоверно более низкие значения Cd, Sr имели гетерозиготные (AG) и гомозиготные по мутантному аллелю (GG) животные. Так, превосходство AA-варианта по содержанию Cd составляло 28,31% по сравнению с AG-группой, а с генотипом GG — 55,19% ($p = 0,018$) (рис. 4). Уровень Sr в группах с мутантным G-аллелем был ниже показателей AA-генотипа на 19,92% и 16,05% ($p = 0,046$), соответственно, для гетерозиготных (AG) и гомозиготных (GG) животных. Схожую тенденцию отмечали для Al.

Мутация в гене TLR4 может оказывать влияние на накопление и усвоение макро- и микроэлементов в организме животных через различные механизмы. Рецептор TLR4 играет ключевую роль в распознавании патогенов и активации воспалительного ответа. Воспаление оказывает существенное воздействие на метаболизм и распределение элементов в теле животных. Активация TLR4 приводит к высвобождению провоспалительных цитокинов, таких как интерлейкин-6 (IL-6) и фактор некроза опухоли альфа (TNF- α). Эти цитокины влияют на метаболизм железа, цинка и других микроэлементов.

Изменение функции TLR4 оказывает влияние на барьерную функцию и проницаемость кишечника и, следовательно, на всасывание макро- и микроэлементов. Кроме того, рецептор взаимодействует с микробиотой кишечника, изменение структуры гена *TLR4* способно оказывать влияние на ее состав и, как следствие, на метаболизм различных элементов [43]. Кроме того, воспалительный процесс и сигнальные пути, активируемые через TLR4, могут регулировать экспрессию транспортных белков, таких как трансферрин и металлотронеин, участвующих в метаболизме макро- и микроэлементов [44].

Сравнивая элементный статус сыворотки крови коров с генотипом AG и GG, отмечали статистически значимые различия в макроэлементном составе животных двух групп. Так, содержание K (рис. 5а) у носителей GG-варианта оказалось на 10,34% ($p = 0,032$) выше по сравнению с AG-группой, а уровень Ca (рис. 5б) — на 3,3% ($p = 0,047$) относительно гетерозиготных животных. Схожая тенденция прослеживалась для макроэлементов P и Mg, значения которых оказались, соответственно, выше на 9,55% и 4,96% у гомозиготных коров по мутантному аллелю.

Концентрация кальция имеет решающее значение для большого спектра клеточных механизмов иммунного ответа (например, кальций опосредует функции TLR) [45]. При стимуляции TLR внутриклеточные уровни кальция увеличиваются либо из внутренних запасов в просвете эндоплазматического ретикула (ЭР), либо за счет притока из внеклеточного пространства.

Рис. 4. Относительная разница концентрации потенциально токсичных и токсичных микроэлементов в сыворотке крови коров красной степной породы с генотипами GG и AG гена TLR4 по сравнению с генотипом AA (100%), %. Различия между группами с генотипами GG и AG по сравнению с группой с генотипом AA статистически значимы при $p < 0,05$ (*)

Fig. 4. Relative difference in the concentration of potentially toxic and toxic microelements in the blood serum of Red Steppe cows with the GG and AG genotypes of the TLR4 gene compared to the AA genotype (100%), %. Differences between groups with the GG and AG genotypes compared to the group with the AA genotype are statistically significant at $p < 0.05$ (*)

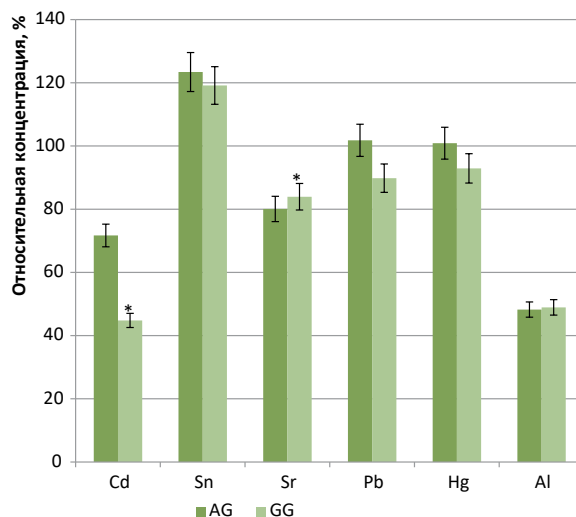
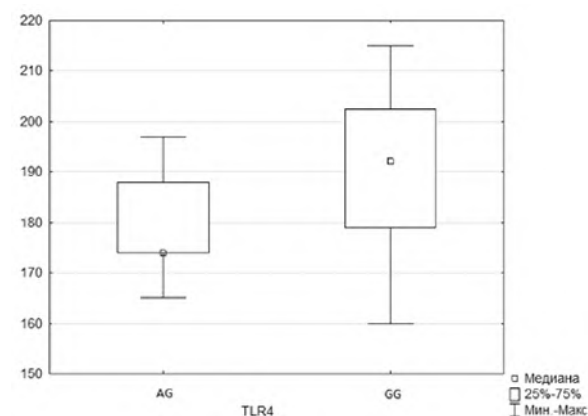
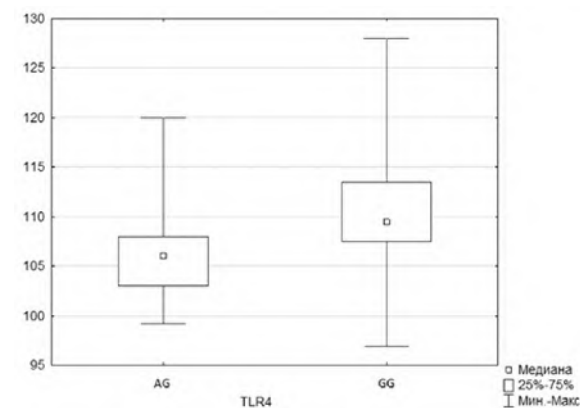


Рис. 5. Концентрация калия (а) и кальция (б) в сыворотке крови коров с генотипами AG и GG гена TLR4. Полученные данные представлены в виде медианы (Me) и 25–75-го квартилей

Fig. 5. Concentration of potassium (a) and calcium (b) in the blood serum of cows with the AG and GG genotype of the TLR4 gene. The obtained data are presented as a median (Me) and 25–75 quartiles



а (а)



б (б)

Предыдущие исследования показали, что повышенное внутриклеточное содержание кальция играет важную роль в опосредовании иммунного ответа, запускаемого TLR [46].

В большинстве исследований внимание уделялось внутриклеточной мобилизации кальция. Однако TLR могут запускать высвобождение кальция из ЭР, а затем опосредованный STIM-ORAI вход кальция. Tang Songqing и колл. [47] изменили концентрации стимулов и обнаружили, что добавление Ca^{2+} в среду значительно увеличивает продукцию цитокинов и хемокинов макрофагами дозозависимым образом. Эти данные позволяют предположить, что разные концентрации Ca^{2+} , подобно разной интенсивности лигандов TLR, могут влиять на силу ответа макрофагов. Исследование сигнального пути TLR показывает, что внеклеточный кальций участвует в регуляции ответа TLR посредством прямой активации киназного сигнального пути, регулируемого внеклеточным сигналом [48].

Таким образом, внеклеточный кальций после входа, опосредованного STIM1, может управлять прямой регуляцией передачи сигналов TLR [49], что способствует активации макрофагов посредством механизма прямой связи. Данный факт может являться причиной более высоких концентраций Ca в группе животных с генотипом GG, ассоциированным с устойчивостью к бактериальным инфекциям.

Статистически значимые различия между анализируемыми группами фиксировались в отношении условно-эссенциального микроэлемента — бора (В), концентрация которого в сыворотке крови гетерозиготных животных оказалась на 3,61% ($p = 0,035$) выше по сравнению с группой гомозиготных по мутантному аллелю животных.

В группе эссенциальных элементов наблюдали тенденцию к более низкому содержанию Cr, Fe и Se у гомозиготных коров по мутантному аллелю в сравнении с гетерозиготной группой. Исключение составлял Cu: концентрация данного элемента у носителей мутации оказалась наиболее низкой среди прочих групп животных.

Среди потенциально токсичных элементов значительная детерминация генотипом выявлена по уровню Cd, который оказался ниже в гомозиготной GG-группе на 37,5% относительно гетерозиготных особей.

Таким образом, генотип AA у коров красной степной породы ассоциирован с более высокими значениями Cu, Zn, Sr, а также Fe, Se, Li, Cd и Al и более низким содержанием Cr:

$$AA = \frac{\nearrow Cu, Zn, Fe, Se, Sr, Li, Cd, Al}{\swarrow Cr}$$

Генотип AG ассоциирован с более высокой концентрацией в сыворотке крови Cd и более низким содержанием макроэлементов Ca, K, P:

$$AG = \frac{\nearrow Cd}{\swarrow Ca, K, P}$$

Для мутантного генотипа GG характерны повышенные концентрации Ca и P и более низкие значения Cd в сыворотке крови:

$$GG = \frac{\nearrow Ca, P}{\swarrow Cd}$$

Изменчивость концентрации K в сыворотке крови животных имела схожую с уровнем Ca тенденцию в зависимости от аллельного варианта гена *TLR4*. Для группы гетерозиготных животных было характерно достоверно наиболее низкое содержание данного макроэлемента в сравнении с другими исследуемыми группами. Кальций и калий находятся в тесной взаимосвязи. Различия в концентрациях кальция и калия в сыворотке крови между животными с генотипами AG и GG, вероятно, обусловлены комплексным взаимодействием воспалительных процессов, изменением функции кишечника, генетической регуляцией и эпигенетическими изменениями. Животные с генотипом GG отличаются эффективным механизмом регуляции кальция, в то время как гетерозиготные животные (AG) характеризуются измененным балансом электролитов, что приводит к более низким уровням калия.

Содержание P и Mg в группе гетерозиготных животных было минимальным среди изученных генотипов. Наивысший уровень P и Ca зафиксирован в сыворотке крови коров с генотипом GG. На гомеостаз кальция, фосфора и магния влияют одни и те же гомеостатические механизмы [50], в результате чего изменения их концентраций в большинстве случаев взаимосвязаны [51].

Zhang Daohai [52] и колл. установили, что высокий уровень фосфата может усиливать экспрессию TLR4, активировать сигнальный путь NF-κB и, таким образом, вызывать выработку воспалительных цитокинов. Магний снижает TLR-опосредованное производство цитокинов путем регуляции транскрипции, повышая уровни IκBα и снижая активацию NF-κB. Следует отметить, что магний действует как физиологический блокатор кальциевых каналов [53].

Статистически значимые различия отмечены в отношении Zn и Cu между группами с вариантами AA и AG. Генотип AA был ассоциирован с наиболее высокими показателями данных эссенциальных микроэлементов. Соответствующие уровни цинка необходимы для правильного функционирования иммунной системы, в то время как чрезмерное содержание цинка оказывает на нее негативное воздействие [54, 55]. При врожденном иммунитете цинк сохраняет естественную барьерную структуру и функцию эпителиальной мембраны [56]. Цинк может модулировать воспаление посредством передачи сигналов TLR на разных уровнях и путях. Доказано участие Zn в различных иммунных заболеваниях, поражая В-, Т- и дендритные клетки (ДК). Стимуляция агонистом TLR4 ЛПС изменяла экспрессию переносчиков Zn в ДК, тем

самым снижая уровни свободного внутриклеточного Zn [57]. Известно, что Zn ингибирует активацию NF- κ B, что в свою очередь снижает выработку провоспалительных цитокинов, TNF- α , IL-1 β и IL-6.

В исследовании Maiguma Masayuki и колл. [58] было выяснено, что экспрессия TLR4 значительно увеличивалась при стимуляции ЛПС в условиях низкого и нормального содержания Zn. Однако экспрессия TLR4 в условиях высокого содержания Zn была ослаблена даже в присутствии ЛПС.

Содержание Cr в сыворотке крови животных с референсным генотипом значительно уступало носителям мутантной аллели. В ряде исследований продуктивность растущих животных, иммунный ответ и некоторые параметры крови положительно изменялись при добавлении хрома в корма. Кроме того, Kamei Nozomu и колл. [59] показали, что Cr может играть противовоспалительную роль, ингибируя активацию ядерного фактора каппа В (NF- κ B) и ослабляя резистентность к инсулину, что приводит к снижению количества провоспалительных цитокинов, включая TNF- α , интерлейкин-6 (IL-6) и С-. Уровни реактивного белка у крыс с диабетом.

Отмечалась тенденция к более высокому содержанию Fe в группе животных, имеющих вариант AA гена *TLR4*. Железо необходимо для создания эффективных иммунных ответов против вторгающихся патогенов [60], таких как дифференцировка и пролиферация Т-лимфоцитов и выработка активных форм кислорода (АФК) для уничтожения патогенов [61].

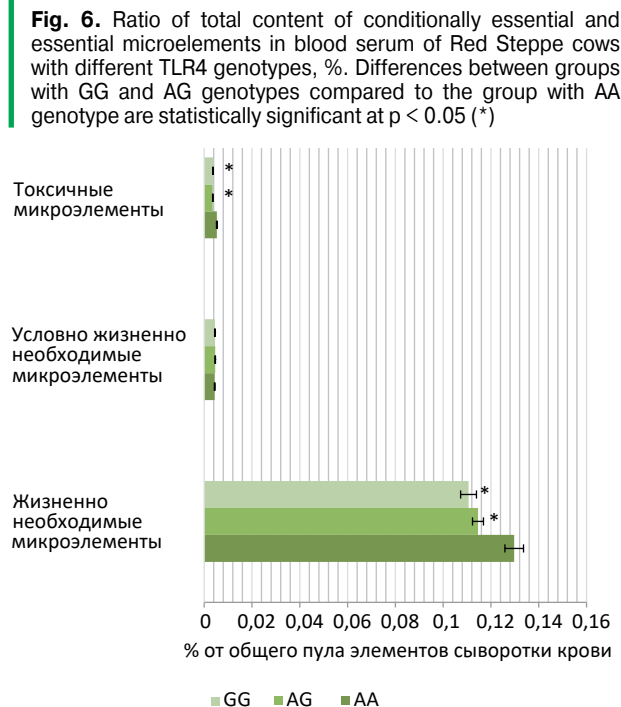
Среди условно-эссенциальных элементов концентрация бора оказалась достоверно ниже у гомозиготных носителей мутантного аллеля в сравнении с другими исследуемыми группами.

Коровы красной степной породы с генотипом AA характеризовались более высоким содержанием потенциально токсичных элементов, в том числе Sr, Al, Cd. Высокие значения Cd были характерны и для группы с генотипом AG.

Ген TLR4 играет ключевую роль в распознавании патогенов и активации врожденного иммунного ответа. В настоящем исследовании авторы обнаружили, что уровни эссенциальных элементов, таких как кальций, калий, фосфор, магний, цинк, медь, хром и железо, а также токсичных металлов (стронций, алюминий, кадмий) варьируют в зависимости от генотипа TLR4.

Таким образом, результаты данного исследования показывают, что генотип TLR4 детерминирует содержание микроэлементов в сыворотке крови, что в свою очередь способно модулировать иммунные и воспалительные реакции у коров красной степной породы. Кальций, участвующий в передаче сигналов в клетках, и калий, необходимый для поддержания мембранного потенциала, могут модулировать активацию иммунных клеток через TLR4.

Рис. 6. Соотношение суммарного содержания условно-эссенциальных и эссенциальных микроэлементов в сыворотке крови коров красной степной породы с различными генотипами TLR4, %. Различия между группами с генотипами GG и AG по сравнению с группой с генотипом AA статистически значимы при $p < 0,05$ (*)



Фосфор, являющийся ключевым компонентом нуклеотидов и фосфолипидов, может быть вовлечен в фосфорилирование белков, что важно для передачи сигналов через TLR4. Магний, участвующий в многочисленных ферментативных реакциях, может модулировать воспалительные реакции, связанные с активацией TLR4. Цинк, необходимый для функционирования иммунных клеток и антиоксидантной защиты, и медь, участвующая в антиоксидантной защите, могут влиять на экспрессию TLR4 и модулировать воспалительный ответ. Хром, задействованный в метаболизме углеводов и липидов, и железо, важное для транспорта кислорода и функции иммунных клеток, влияют на активацию TLR4 и последующие воспалительные реакции.

Токсичные металлы, такие как стронций, алюминий и кадмий, усиливают воспалительные реакции через активацию TLR4 и других сигнальных путей, что подчеркивает важность изучения их взаимодействия с геном TLR4.

Коровы с генотипом AA характеризовались наибольшим суммарным содержанием как эссенциальных микроэлементов, так и значительным преобладанием токсичных микроэлементов в сравнении с другими группами (рис. 6).

Так, генотипы AG и GG уступали по содержанию токсичных элементов на 32,2% и 31,0% относительно AA-варианта, а по концентрации эссенциальных микроэлементов эта разница составляла 11,6% и 14,7% соответственно. Суммарное содержание макроэлементов незначительно различалось между исследуемыми группами.

Выводы/Conclusions

По результатам исследования полиморфизм в гене TLR4 rs8193046 отражался на показателях клинического анализа крови животных, в частности на содержании лейкоцитов. Животные с генотипом AG характеризовались наиболее высоким содержанием лейкоцитов в крови, доминирующее положение среди которых занимали гранулоциты, что может быть связано с более активным иммунным ответом.

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 соответствии с планом НИР на 2025–2027 гг. Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (№ FNWZ-2025-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Miroshnikov S., Notova S., Kazakova T., Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2021; 28(36): 49852–49863. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14198-6>
2. Горлов И.Ф. и др. Влияние новых кормовых добавок на продуктивность коров красной степной породы. *Аграрный вестник Урала*. 2023; 04(233): 61–69. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-233-04-61-69>
3. Овчинникова Е.К., Судаков Н.Н., Максимиук Н.Н., Морозов М.В. Совершенствование условий содержания и кормления молочных коров. *Аграрная наука*. 2024; (12): 70–76. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-70-76>
4. Rybachuk Zh., Revunets A., Galatyuk O., Romanysheyna T., Behas V. Pharmacological effects of the use of enzyme and probiotic feed additive for dry cows. *Наукові горизонти*. 2024; 27(6): 9–18. <https://doi.org/10.48077/sciior6.2024.09>
5. Bartens M.-C. et al. Single Nucleotide Polymorphisms in the Bovine TLR2 Extracellular Domain Contribute to Breed and Species-Specific Innate Immune Functionality. *Frontiers in Immunology*. 2021; 12: 764390. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.764390>
6. Власенко Н.В., Чанышев М.Д., Хафизов К.Ф., Кузин С.Н., Акимкин В.Г. Значимость генов главного комплекса гистосовместимости в отношении иммунитета против гепатита А. *Инфекционные болезни в современном мире: эволюция, текущие и будущие угрозы. Сборник трудов XVI Ежегодного всероссийского конгресса по инфекционным болезням им. академика В.И. Покровского*. М.: Медицинское маркетинговое агентство. 2024; 49. <https://www.elibrary.ru/athfer>
7. Бородин Н.Е., Сибен А.Н. Генетическое различие в иммунном ответе домашних и диких птиц. *Аграрная наука в контексте времени. Сборник трудов LX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья. 2025; 5–8. <https://www.elibrary.ru/wytryr>
8. Карпова Н.С., Нурбеков М.К., Дмитренко О.П., Терехина О.Л. Путь от поиска генетической предрасположенности к развитию заболеваний до разработки терапии. *От рождения до активного долголетия. Сборник тезисов докладов II Международного форума геномных и биомедицинских технологий*. Surgut: Издательский центр Surgutского государственного университета. 2024; 49–50. <https://www.elibrary.ru/jljzwp>
9. Решетникова А.А. и др. Определение экспрессии генов TNFAIP3, CDS1 и MTAP в популяции свиней породы крупная белая. *Аграрная наука*. 2025; (2): 95–100. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-95-100>
10. Максимчук М.Г., Левина Г.Н. Молочная продуктивность и функция воспроизводства коров черно-пестрой породы разных генотипов. *Аграрная наука*. 2023; (8): 53–57. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-53-57>
11. Сабетова К.Д. и др. Молочная продуктивность и уровень кетоновых тел в крови коров костромской породы разных генотипов LEP. *Аграрная наука*. 2024; (6): 56–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-56-61>

Генотип GG гена TLR4 был выделен как вариант, ассоциированный с более высоким содержанием важнейших для молочного скота макроэлементов — кальция и фосфора, а также с более низким содержанием токсичных микроэлементов, включая кадмий. Наличие в стаде красной степной породы носителей альтернативных аллелей позволяет проводить отбор, направленный на повышение резистентности к инфекционным заболеваниям.

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

FUNDING

The research was carried out in accordance with the research plan for 2025–2027 of the Federal Scientific Center for Biological Systems and Agricultural Technologies of the Russian Academy of Sciences (No. FNWZ-2025-0001).

REFERENCES

1. Miroshnikov S., Notova S., Kazakova T., Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2021; 28(36): 49852–49863. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14198-6>
2. Gorlov I.F. et al. Influence of feed additives on the productivity of red steppe cows. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 04(233): 61–69 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-233-04-61-69>
3. Ovchinnikova E.K., Sudakov N.N., Maksimuk N.N., Morozov M.V. Improving the conditions of keeping and feeding dairy cows. *Agrarian science*. 2024; (12): 70–76 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-389-12-70-76>
4. Rybachuk Zh., Revunets A., Galatyuk O., Romanysheyna T., Behas V. Pharmacological effects of the use of enzyme and probiotic feed additive for dry cows. *Scientific Horizons*. 2024; 27(6): 9–18. <https://doi.org/10.48077/sciior6.2024.09>
5. Bartens M.-C. et al. Single Nucleotide Polymorphisms in the Bovine TLR2 Extracellular Domain Contribute to Breed and Species-Specific Innate Immune Functionality. *Frontiers in Immunology*. 2021; 12: 764390. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.764390>
6. Vlasenko N.V., Chanyshv M.D., Khafizov K.F., Kuzin S.N., Akimkin V.G. The importance of major histocompatibility complex genes in immunity against hepatitis A. *Infectious diseases in the modern world: evolution, current and future threats. Proceedings of the XVI Annual All-Russian Congress on Infectious Diseases named after Academician V.I. Pokrovsky*. Moscow: Medical Marketing Agency. 2024; 49 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/athfer>
7. Borodin N.E., Siben A.N. Genetic differences in the immune response of domestic and wild birds. *Agricultural science in the context of time. Proceedings of the LX International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists*. Tyumen: State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. 2025; 5–8 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wytryr>
8. Karpova N.S., Nurbekov M.K., Dmitrenko O.P., Terekhova O.L. The path from the search for genetic predisposition to disease development to the development of therapy. *From birth to active longevity: Collection of abstracts of reports of the II International Forum of Genomic and Biomedical Technologies*. Surgut: Publishing Center of Surgut State University. 2024; 49–50 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/jljzwp>
9. Reshetnikova A.A. et al. Determination of TNFAIP3, CDS1 and MTAP gene expression in a population of large white pigs. *Agrarian science*. 2025; (2): 95–100 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-95-100>
10. Maksimchuk M.G., Levina G.N. Milk productivity and reproduction function of black-and-white olland cows of different genotypes. *Agrarian science*. 2023; (8): 53–57 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-53-57>
11. Sabetova K.D. et al. Milk productivity and the concentration of ketones in the blood of Kostroma cows of different LEP genotypes. *Agrarian science*. 2024; (6): 56–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-56-61>

12. Тарасова Е.И. Элементный состав сыворотки крови молочных коров с различными полиморфными вариантами гена TLR4. *Современные достижения и проблемы физиологии и кормления животных. Сборник тезисов Международного научного форума «Современные достижения и проблемы физиологии и кормления животных», посвященного 120-летию со дня рождения академика А.Д. Синещёкова и 100-летию со дня рождения профессора В.А. Крохиной.* Подольск: ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, 2024; 62–64.
<https://www.elibrary.ru/lticzb>
13. Тарасова Е.И. Полиморфизм гена TLR4 и его влияние на продуктивность и элементный состав крови коров черно-пестрой породы трех областей России. *Зоотехния сегодня — приоритеты и перспективы развития. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженных деятелей науки Российской Федерации В.И. Левахина и Г.И. Левахина.* Оренбург: Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. 2025; 151–155.
<https://www.elibrary.ru/cxmdpl>
14. Chen H. *et al.* Contribution of the mutation rs8193069 in *TLR4* to mastitis resistance and performance in Holstein cows in southern China. *Veterinary Medicine and Science*. 2022; 8(1): 357–366.
<https://doi.org/10.1002/vms3.671>
15. Zamorano-Algandar R. *et al.* Genetic Markers Associated with Milk Production and Thermotolerance in Holstein Dairy Cows Managed in a Heat-Stressed Environment. *Biology*. 2023; 12(5): 679.
<https://doi.org/10.3390/biology12050679>
16. Mukherjee S., Huda S., Sinha Babu S.P. Toll-like receptor polymorphism in host immune response to infectious diseases: A review. *Scandinavian Journal of Immunology*. 2019; 90(1): e12771.
<https://doi.org/10.1111/sji.12771>
17. Sameer A.S., Nissar S. Toll-Like Receptors (TLRs): Structure, Functions, Signaling, and Role of Their Polymorphisms in Colorectal Cancer Susceptibility. *BioMed Research International*. 2021; 2021: 1157023.
<https://doi.org/10.1155/2021/1157023>
18. Maurić Maljković M., Vlahek I., Piplica A., Ekert Kabalin A., Sušić V., Stevanović V. Prospects of toll-like receptors in dairy cattle breeding. *Animal Genetics*. 2023; 54(4): 425–434.
<https://doi.org/10.1111/age.13325>
19. Sharma B.S., Leyva I., Schenkel F., Karrow N.A. Association of Toll-Like Receptor 4 Polymorphisms with Somatic Cell Score and Lactation Persistency in Holstein Bulls. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(9): 3626–3635.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72402-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72402-X)
20. Wang M. *et al.* Toll-like receptor 4 gene polymorphisms influence milk production traits in Chinese Holstein cows. *Journal of Dairy Research*. 2018; 85(4): 407–411.
<https://doi.org/10.1017/S0022029918000535>
21. Gopi B. *et al.* Single-nucleotide polymorphisms in *CLEC7A*, *CD209* and *TLR4* gene and their association with susceptibility to paratuberculosis in Indian cattle. *Journal of Genetics*. 2020; 99: 14.
<https://doi.org/10.1007/s12041-019-1172-4>
22. Badami S., Thanissar J., Barathiraja S., Anitha T., Upadhyaya I., Kumar Mukhopadhyay H. Identification of single nucleotide variations in the Toll-like receptor 9 (TLR9) gene and its association to mastitis susceptibility in dairy cattle. *Biological Rhythm Research*. 2019; 50(6): 887–896.
<https://doi.org/10.1080/09291016.2018.1502233>
23. Свириденко Г.М., Мордвинова В.А., Вахрушева Д.С., Остроухова И.Л. Маститы — проблема безопасности, качества и сыропригодности молока сырого. *Сыроделие и маслоделие*. 2024; (3): 58–63.
<https://doi.org/10.21603/2073-4018-2024-3-5>
24. Tarasova E., Notova S., Markova I., Kataev V., Plotnikov A. PSI-B-27 Association of multiple SNP in the LRP4 gene with features of the cattle elemental status. *Journal of Animal Science*. 2021; 99(S3): 227.
<https://doi.org/10.1093/jas/skab235.414>
25. Sizova E.A. *et al.* Serum and Hair Trace Element and Mineral Levels in Dairy Cows in Relation to Daily Milk Yield. *Biological Trace Element Research*. 2022; 200(6): 2709–2715.
<https://doi.org/10.1007/s12011-021-02878-w>
26. Miroshnikov S.A., Skalny A.V., Zavyalov O.A., Frolov A.N., Grabeklis A.R. The Reference Values of Hair Content of Trace Elements in Dairy Cows of Holstein Breed. *Biological Trace Element Research*. 2020; 194(1): 145–151.
<https://doi.org/10.1007/s12011-019-01768-6>
27. Littledike E.T., Wittum T.E., Jenkins T.G. Effect of breed, intake, and carcass composition on the status of several macro and trace minerals of adult beef cattle. *Journal of Animal Science*. 1995; 73(7): 2113–2119.
<https://doi.org/10.2527/1995.7372113x>
28. Elmaghraby M.M., El-Nahas A.F., Fathala M.M., Sahwan F.M., Tag El-Dien M.A. Association of toll-like receptors 2 and 6 polymorphism with clinical mastitis and production traits in Holstein cattle. *Iranian Journal of Veterinary Research*. 2018; 19(3): 202–207.
12. Tarasova E.I. Elemental composition of blood serum of dairy cows with different polymorphic variants of the TLR4 gene. *Modern achievements and problems of animal physiology and nutrition: Collection of abstracts of the international scientific forum “Modern achievements and problems of animal physiology and nutrition” dedicated to the 120th anniversary of the birth of academician A.D. Sineshchekov and the 100th anniversary of the birth of professor V.A. Krokina.* Podolsk: L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. 2024; 62–64 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/lticzb>
13. Tarasova E.I. Polymorphism of the TLR4 gene and its effect on the productivity and elemental composition of the blood of Black-and-White cows in three regions of Russia. *Animal science today — priorities and development prospects. Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of Honored Scientists of the Russian Federation V.I. Levakhin and G.I. Levakhin.* Orenburg: Federal Research Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences. 2025; 151–155 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/cxmdpl>
14. Chen H. *et al.* Contribution of the mutation rs8193069 in *TLR4* to mastitis resistance and performance in Holstein cows in southern China. *Veterinary Medicine and Science*. 2022; 8(1): 357–366.
<https://doi.org/10.1002/vms3.671>
15. Zamorano-Algandar R. *et al.* Genetic Markers Associated with Milk Production and Thermotolerance in Holstein Dairy Cows Managed in a Heat-Stressed Environment. *Biology*. 2023; 12(5): 679.
<https://doi.org/10.3390/biology12050679>
16. Mukherjee S., Huda S., Sinha Babu S.P. Toll-like receptor polymorphism in host immune response to infectious diseases: A review. *Scandinavian Journal of Immunology*. 2019; 90(1): e12771.
<https://doi.org/10.1111/sji.12771>
17. Sameer A.S., Nissar S. Toll-Like Receptors (TLRs): Structure, Functions, Signaling, and Role of Their Polymorphisms in Colorectal Cancer Susceptibility. *BioMed Research International*. 2021; 2021: 1157023.
<https://doi.org/10.1155/2021/1157023>
18. Maurić Maljković M., Vlahek I., Piplica A., Ekert Kabalin A., Sušić V., Stevanović V. Prospects of toll-like receptors in dairy cattle breeding. *Animal Genetics*. 2023; 54(4): 425–434.
<https://doi.org/10.1111/age.13325>
19. Sharma B.S., Leyva I., Schenkel F., Karrow N.A. Association of Toll-Like Receptor 4 Polymorphisms with Somatic Cell Score and Lactation Persistency in Holstein Bulls. *Journal of Dairy Science*. 2006; 89(9): 3626–3635.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72402-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72402-X)
20. Wang M. *et al.* Toll-like receptor 4 gene polymorphisms influence milk production traits in Chinese Holstein cows. *Journal of Dairy Research*. 2018; 85(4): 407–411.
<https://doi.org/10.1017/S0022029918000535>
21. Gopi B. *et al.* Single-nucleotide polymorphisms in *CLEC7A*, *CD209* and *TLR4* gene and their association with susceptibility to paratuberculosis in Indian cattle. *Journal of Genetics*. 2020; 99: 14.
<https://doi.org/10.1007/s12041-019-1172-4>
22. Badami S., Thanissar J., Barathiraja S., Anitha T., Upadhyaya I., Kumar Mukhopadhyay H. Identification of single nucleotide variations in the Toll-like receptor 9 (TLR9) gene and its association to mastitis susceptibility in dairy cattle. *Biological Rhythm Research*. 2019; 50(6): 887–896.
<https://doi.org/10.1080/09291016.2018.1502233>
23. Свириденко Г.М., Мордвинова В.А., Вахрушева Д.С., Остроухова И.Л. Маститы — проблема безопасности, качества и suitability of raw milk for cheese production. *Syrodelye i maslodelye (Cheese and butter making)*. 2024; (3): 58–63 (in Russian).
<https://doi.org/10.21603/2073-4018-2024-3-5>
24. Tarasova E., Notova S., Markova I., Kataev V., Plotnikov A. PSI-B-27 Association of multiple SNP in the LRP4 gene with features of the cattle elemental status. *Journal of Animal Science*. 2021; 99(S3): 227.
<https://doi.org/10.1093/jas/skab235.414>
25. Sizova E.A. *et al.* Serum and Hair Trace Element and Mineral Levels in Dairy Cows in Relation to Daily Milk Yield. *Biological Trace Element Research*. 2022; 200(6): 2709–2715.
<https://doi.org/10.1007/s12011-021-02878-w>
26. Miroshnikov S.A., Skalny A.V., Zavyalov O.A., Frolov A.N., Grabeklis A.R. The Reference Values of Hair Content of Trace Elements in Dairy Cows of Holstein Breed. *Biological Trace Element Research*. 2020; 194(1): 145–151.
<https://doi.org/10.1007/s12011-019-01768-6>
27. Littledike E.T., Wittum T.E., Jenkins T.G. Effect of breed, intake, and carcass composition on the status of several macro and trace minerals of adult beef cattle. *Journal of Animal Science*. 1995; 73(7): 2113–2119.
<https://doi.org/10.2527/1995.7372113x>
28. Elmaghraby M.M., El-Nahas A.F., Fathala M.M., Sahwan F.M., Tag El-Dien M.A. Association of toll-like receptors 2 and 6 polymorphism with clinical mastitis and production traits in Holstein cattle. *Iranian Journal of Veterinary Research*. 2018; 19(3): 202–207.

29. Sharma B.S. *et al.* Association of TLR4 polymorphisms with *Mycobacterium avium* subspecies *paratuberculosis* infection status in Canadian Holsteins. *Animal Genetics*. 2015; 46(5): 560–565. <https://doi.org/10.1111/age.12333>
30. El-Zayat S.R., Sibaii H., Mannaa F.A. Micronutrients and many important factors that affect the physiological functions of toll-like receptors. *Bulletin of the National Research Centre*. 2019; 43: 123. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0165-z>
31. Yang J. *et al.* Regularity of Toll-Like Receptors in Bovine Mammary Epithelial Cells Induced by *Mycoplasma bovis*. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 846700. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.846700>
32. Zhou H., Cheng L., Gong H., Byun S.O., Edwards G.R., Hickford J.G.H. Variation in the Toll-like Receptor 4 (TLR4) gene affects milk traits in dairy cows. *Journal of Dairy Research*. 2017; 84(4): 426–429. <https://doi.org/10.1017/S0022029917000711>
33. Spears J.W. Micronutrients and immune function in cattle. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2000; 59(4): 587–594. <https://doi.org/10.1017/S0029665100000835>
34. Arthington J.D., Ranches J. Trace Mineral Nutrition of Grazing Beef Cattle. *Animals*. 2021; 11(10): 2767. <https://doi.org/10.3390/ani11102767>
35. Луцай В.И., Руденко П.А., Сибирцев В.Д., Неведов А.М. Эффективность терапии высокопродуктивных коров при коморбидном течении акушерско-гинекологической и ортопедической патологии. *Аграрная наука*. 2025; (5): 41–47. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-41-47>
36. Spears J.W., Weiss W.P. Invited Review: Mineral and vitamin nutrition in ruminants. *The Professional Animal Scientist*. 2014; 30(2): 180–191. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30103-0](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30103-0)
37. Munteanu C., Schwartz B. The relationship between nutrition and the immune system. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 1082500. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1082500>
38. Zhu C., Chen G., Yao J., Lin W. Effect of infection after liver cancer interventional therapy on T lymphocyte subsets and Toll-like receptors in peripheral blood mononuclear cells and its mechanism. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 2022; 31(1): 17–23. <https://doi.org/10.17219/acem/141499>
39. Ribeiro-Gomes F.L. *et al.* Neutrophils Activate Macrophages for Intracellular Killing of *Leishmania major* through Recruitment of TLR4 by Neutrophil Elastase. *Journal of Immunology*. 2007; 179(6): 3988–3994. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.179.6.3988>
40. Puck A. *et al.* The soluble cytoplasmic tail of CD45 regulates T-cell activation via TLR4 signaling. *European Journal of Immunology*. 2021; 51(12): 3176–3185. <https://doi.org/10.1002/eji.202149227>
41. Mitsuhashi M. *Ex vivo* simulation of leukocyte function: Stimulation of specific subsets of leukocytes in whole blood followed by the measurement of function-associated mRNAs. *Journal of Immunological Methods*. 2010; 363(1): 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.jim.2010.10.002>
42. Sanguinetti C. *et al.* Binding of Gamma-Glutamyl Transferase to TLR4 Signalling Allows Tissue Factor Activation in Monocytes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(20): 12207. <https://doi.org/10.3390/ijms232012207>
43. Lu P. *et al.* Intestinal epithelial Toll-like receptor 4 prevents metabolic syndrome by regulating interactions between microbes and intestinal epithelial cells in mice. *Mucosal Immunology*. 2018; 11(3): 727–740. <https://doi.org/10.1038/mi.2017.114>
44. Wathe D.C. *et al.* Relationships between metabolic profiles and gene expression in liver and leukocytes of dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(3): 3596–3616. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19165>
45. Kenny E.F., Quinn S.R., Doyle S.L., Vink P.M., van Eenennaam H., O'Neill L.A.J. Bruton's Tyrosine Kinase Mediates the Synergistic Signalling between TLR9 and the B Cell Receptor by Regulating Calcium and Calmodulin. *PLoS ONE*. 2013; 8(8): e74103. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074103>
46. Shintani Y. *et al.* Toll-like receptor 9 protects non-immune cells from stress by modulating mitochondrial ATP synthesis through the inhibition of SERCA2. *EMBO Reports*. 2014; 15(4): 438–445. <https://doi.org/10.1002/embr.201337945>
47. Tang S. *et al.* Extracellular calcium elicits feedforward regulation of the Toll-like receptor-triggered innate immune response. *Cellular & Molecular Immunology*. 2017; 14(2): 180–191. <https://doi.org/10.1038/cmi.2015.59>
48. Oh-hora M. *et al.* Dual functions for the endoplasmic reticulum calcium sensors STIM1 and STIM2 in T cell activation and tolerance. *Nature Immunology*. 2008; 9(4): 432–443. <https://doi.org/10.1038/ni1574>
49. Hogan P.G., Lewis R.S., Rao A. Molecular Basis of Calcium Signaling in Lymphocytes: STIM and ORAI. *Annual Review of Immunology*. 2010; 28: 491–533. <https://doi.org/10.1146/annurev.immunol.021908.132550>
29. Sharma B.S. *et al.* Association of TLR4 polymorphisms with *Mycobacterium avium* subspecies *paratuberculosis* infection status in Canadian Holsteins. *Animal Genetics*. 2015; 46(5): 560–565. <https://doi.org/10.1111/age.12333>
30. El-Zayat S.R., Sibaii H., Mannaa F.A. Micronutrients and many important factors that affect the physiological functions of toll-like receptors. *Bulletin of the National Research Centre*. 2019; 43: 123. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0165-z>
31. Yang J. *et al.* Regularity of Toll-Like Receptors in Bovine Mammary Epithelial Cells Induced by *Mycoplasma bovis*. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 846700. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.846700>
32. Zhou H., Cheng L., Gong H., Byun S.O., Edwards G.R., Hickford J.G.H. Variation in the Toll-like Receptor 4 (TLR4) gene affects milk traits in dairy cows. *Journal of Dairy Research*. 2017; 84(4): 426–429. <https://doi.org/10.1017/S0022029917000711>
33. Spears J.W. Micronutrients and immune function in cattle. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2000; 59(4): 587–594. <https://doi.org/10.1017/S0029665100000835>
34. Arthington J.D., Ranches J. Trace Mineral Nutrition of Grazing Beef Cattle. *Animals*. 2021; 11(10): 2767. <https://doi.org/10.3390/ani11102767>
35. Lutsay V.I., Rudenko P.A., Sibirtsev V.D., Nefedov A.M. Efficiency of therapy of highly productive cows with comorbid obstetric-gynecological and orthopedic pathology. *Agrarian science*. 2025; (5): 41–47 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-41-47>
36. Spears J.W., Weiss W.P. Invited Review: Mineral and vitamin nutrition in ruminants. *The Professional Animal Scientist*. 2014; 30(2): 180–191. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30103-0](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30103-0)
37. Munteanu C., Schwartz B. The relationship between nutrition and the immune system. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 1082500. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1082500>
38. Zhu C., Chen G., Yao J., Lin W. Effect of infection after liver cancer interventional therapy on T lymphocyte subsets and Toll-like receptors in peripheral blood mononuclear cells and its mechanism. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 2022; 31(1): 17–23. <https://doi.org/10.17219/acem/141499>
39. Ribeiro-Gomes F.L. *et al.* Neutrophils Activate Macrophages for Intracellular Killing of *Leishmania major* through Recruitment of TLR4 by Neutrophil Elastase. *Journal of Immunology*. 2007; 179(6): 3988–3994. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.179.6.3988>
40. Puck A. *et al.* The soluble cytoplasmic tail of CD45 regulates T-cell activation via TLR4 signaling. *European Journal of Immunology*. 2021; 51(12): 3176–3185. <https://doi.org/10.1002/eji.202149227>
41. Mitsuhashi M. *Ex vivo* simulation of leukocyte function: Stimulation of specific subsets of leukocytes in whole blood followed by the measurement of function-associated mRNAs. *Journal of Immunological Methods*. 2010; 363(1): 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.jim.2010.10.002>
42. Sanguinetti C. *et al.* Binding of Gamma-Glutamyl Transferase to TLR4 Signalling Allows Tissue Factor Activation in Monocytes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(20): 12207. <https://doi.org/10.3390/ijms232012207>
43. Lu P. *et al.* Intestinal epithelial Toll-like receptor 4 prevents metabolic syndrome by regulating interactions between microbes and intestinal epithelial cells in mice. *Mucosal Immunology*. 2018; 11(3): 727–740. <https://doi.org/10.1038/mi.2017.114>
44. Wathe D.C. *et al.* Relationships between metabolic profiles and gene expression in liver and leukocytes of dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(3): 3596–3616. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19165>
45. Kenny E.F., Quinn S.R., Doyle S.L., Vink P.M., van Eenennaam H., O'Neill L.A.J. Bruton's Tyrosine Kinase Mediates the Synergistic Signalling between TLR9 and the B Cell Receptor by Regulating Calcium and Calmodulin. *PLoS ONE*. 2013; 8(8): e74103. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074103>
46. Shintani Y. *et al.* Toll-like receptor 9 protects non-immune cells from stress by modulating mitochondrial ATP synthesis through the inhibition of SERCA2. *EMBO Reports*. 2014; 15(4): 438–445. <https://doi.org/10.1002/embr.201337945>
47. Tang S. *et al.* Extracellular calcium elicits feedforward regulation of the Toll-like receptor-triggered innate immune response. *Cellular & Molecular Immunology*. 2017; 14(2): 180–191. <https://doi.org/10.1038/cmi.2015.59>
48. Oh-hora M. *et al.* Dual functions for the endoplasmic reticulum calcium sensors STIM1 and STIM2 in T cell activation and tolerance. *Nature Immunology*. 2008; 9(4): 432–443. <https://doi.org/10.1038/ni1574>
49. Hogan P.G., Lewis R.S., Rao A. Molecular Basis of Calcium Signaling in Lymphocytes: STIM and ORAI. *Annual Review of Immunology*. 2010; 28: 491–533. <https://doi.org/10.1146/annurev.immunol.021908.132550>

50. Moreira V.R., Zeringue L.K., Williams C.C., Leonardi C., McCormick M.E. Influence of calcium and phosphorus feeding on markers of bone metabolism in transition cows. *Journal of Dairy Science*. 2009; 92(10): 5189–5198. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2289>
51. Wächter S., Cohrs I., Golbeck L., Wilkens M.R., Grünberg W. Effects of restricted dietary phosphorus supply to dry cows on periparturient calcium status. *Journal of Dairy Science*. 2022; 105(1): 748–760. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20726>
52. Zhang D. *et al.* High Phosphate-Induced Calcification of Vascular Smooth Muscle Cells is Associated with the TLR4/NF- κ B Signaling Pathway. *Kidney and Blood Pressure Research*. 2018; 42(6): 1205–1215. <https://doi.org/10.1159/000485874>
53. Almousa L.A., Salter A.M., Langley-Evans S.C. Varying magnesium concentration elicits changes in inflammatory response in human umbilical vein endothelial cells (HUVECs). *Magnesium Research*. 2018; 31(3): 99–109. <https://doi.org/10.1684/mrh.2018.0439>
54. Haase H. *et al.* Zinc Signals Are Essential for Lipopolysaccharide-Induced Signal Transduction in Monocytes. *Journal of Immunology*. 2008; 181(9): 6491–6502. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.181.9.6491>
55. Скальный А.В., Сотникова Т.И., Коробейникова Т.В., Тиньков А.А. Значение коррекции дефицита цинка в практической медицине: обзор. *Сеченовский вестник*. 2022; 13(4): 4–17. <https://doi.org/10.47093/22187332.2022.13.4.4-17>
56. Liu X. *et al.* Zinc finger protein ZBTB20 promotes toll-like receptor-triggered innate immune responses by repressing *IkB α* gene transcription. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013; 110(27): 11097–11102. <https://doi.org/10.1073/pnas.1301257110>
57. Sharif-Askari E. *et al.* Zinc Finger Protein Gfi1 Controls the Endotoxin-Mediated Toll-Like Receptor Inflammatory Response by Antagonizing NF- κ B p65. *Molecular and Cellular Biology*. 2010; 30(16): 3929–3942. <https://doi.org/10.1128/MCB.00087-10>
58. Maiguma M. *et al.* Dietary Zinc Is a Key Environmental Modifier in the Progression of IgA Nephropathy. *PLoS ONE*. 2014; 9(2): e90558. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090558>
59. Kamei N. *et al.* Overexpression of Monocyte Chemoattractant Protein-1 in Adipose Tissues Causes Macrophage Recruitment and Insulin Resistance. *Journal of Biological Chemistry*. 2006; 281(36): 26602–26614. <https://doi.org/10.1074/jbc.M601284200>
60. de Pontual L. Iron and susceptibility to infections. *Archives de Pédiatrie*. 2017; 24(5S): 5S14–5S17 (in French). [https://doi.org/10.1016/S0929-693X\(17\)24004-4](https://doi.org/10.1016/S0929-693X(17)24004-4)
61. Balounová J., Vavrochová T., Benešová M., Ballek O., Kolář M., Filipp D. Toll-like receptors expressed on embryonic macrophages couple inflammatory signals to iron metabolism during early ontogenesis. *European Journal of Immunology*. 2014; 44(5): 1491–1502. <https://doi.org/10.1002/eji.201344040>

ОБ АВТОРАХ

Екатерина Ивановна Тарасова
младший научный сотрудник
ekaterina45828@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6325-7389>

Елена Анатольевна Сизова
доктор биологических наук, доцент
Sizova.L78@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Елена Владимировна Яшуева
кандидат биологических наук
vasilena56@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>

Святослав Валерьевич Лебедев
доктор биологических наук, член-корреспондент
Российской академии наук
lsv74@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

Федеральный научный центр биологических систем
и агротехнологий Российской академии наук,
ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Россия

50. Moreira V.R., Zeringue L.K., Williams C.C., Leonardi C., McCormick M.E. Influence of calcium and phosphorus feeding on markers of bone metabolism in transition cows. *Journal of Dairy Science*. 2009; 92(10): 5189–5198. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2289>
51. Wächter S., Cohrs I., Golbeck L., Wilkens M.R., Grünberg W. Effects of restricted dietary phosphorus supply to dry cows on periparturient calcium status. *Journal of Dairy Science*. 2022; 105(1): 748–760. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20726>
52. Zhang D. *et al.* High Phosphate-Induced Calcification of Vascular Smooth Muscle Cells is Associated with the TLR4/NF- κ B Signaling Pathway. *Kidney and Blood Pressure Research*. 2018; 42(6): 1205–1215. <https://doi.org/10.1159/000485874>
53. Almousa L.A., Salter A.M., Langley-Evans S.C. Varying magnesium concentration elicits changes in inflammatory response in human umbilical vein endothelial cells (HUVECs). *Magnesium Research*. 2018; 31(3): 99–109. <https://doi.org/10.1684/mrh.2018.0439>
54. Haase H. *et al.* Zinc Signals Are Essential for Lipopolysaccharide-Induced Signal Transduction in Monocytes. *Journal of Immunology*. 2008; 181(9): 6491–6502. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.181.9.6491>
55. Skalny A.V., Sotnikova T.I., Korobeynikova T.V., Tinkov A.A. Significance of zinc deficiency correction for practical medicine: a review. *Sechenov Medical Journal*. 2022; 13(4): 4–17 (in Russian). <https://doi.org/10.47093/2218-7332.2022.13.4.4-17>
56. Liu X. *et al.* Zinc finger protein ZBTB20 promotes toll-like receptor-triggered innate immune responses by repressing *IkB α* gene transcription. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013; 110(27): 11097–11102. <https://doi.org/10.1073/pnas.1301257110>
57. Sharif-Askari E. *et al.* Zinc Finger Protein Gfi1 Controls the Endotoxin-Mediated Toll-Like Receptor Inflammatory Response by Antagonizing NF- κ B p65. *Molecular and Cellular Biology*. 2010; 30(16): 3929–3942. <https://doi.org/10.1128/MCB.00087-10>
58. Maiguma M. *et al.* Dietary Zinc Is a Key Environmental Modifier in the Progression of IgA Nephropathy. *PLoS ONE*. 2014; 9(2): e90558. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090558>
59. Kamei N. *et al.* Overexpression of Monocyte Chemoattractant Protein-1 in Adipose Tissues Causes Macrophage Recruitment and Insulin Resistance. *Journal of Biological Chemistry*. 2006; 281(36): 26602–26614. <https://doi.org/10.1074/jbc.M601284200>
60. de Pontual L. Iron and susceptibility to infections. *Archives de Pédiatrie*. 2017; 24(5S): 5S14–5S17 (in French). [https://doi.org/10.1016/S0929-693X\(17\)24004-4](https://doi.org/10.1016/S0929-693X(17)24004-4)
61. Balounová J., Vavrochová T., Benešová M., Ballek O., Kolář M., Filipp D. Toll-like receptors expressed on embryonic macrophages couple inflammatory signals to iron metabolism during early ontogenesis. *European Journal of Immunology*. 2014; 44(5): 1491–1502. <https://doi.org/10.1002/eji.201344040>

ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina Ivanovna Tarasova
Junior Research Assistant
ekaterina45828@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6325-7389>

Elena Anatolyevna Sizova
Doctor of Biological Sciences, Associate Professor
Sizova.L78@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Elena Vladimirovna Yausheva
Candidate of Biological Sciences
vasilena56@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>

Svyatoslav Valerievich Lebedev
Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member
Russian Academy of Sciences
lsv74@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

Federal Research Centre of Biological Systems and
Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences,
29 9th January Str., Orenburg, 460000, Russia

УДК 636.2.034:636.2.082.12

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-133-141

И.С. Недашковский¹А.А. Сермягин² ✉Е.Н. Нарышкина¹А.С. Абдельманова¹Н.А. Зиновьева¹

¹Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Подольск, Московская обл., Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

✉ alex_sermyagin85@mail.ru

Поступила в редакцию: 06.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Недашковский И.С., Сермягин А.А., Нарышкина Е.Н., Абдельманова А.С., Зиновьева Н.А.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-133-141

Igor S. Nedashkovsky¹Alexander A. Sermyagin² ✉Elena N. Naryshkina¹Alexandra S. Abdelmanova¹Natalia A. Zinovieva¹

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Podolsk, Moscow region, Russia

²Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding — Branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Pushkin, St. Petersburg, Russia

✉ alex_sermyagin85@mail.ru

Received by the editorial office: 06.07.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Nedashkovsky I.S., Sermyagin A.A., Naryshkina E.N., Abdelmanova A.S., Zinovieva N.A.

Сравнительный популяционно-генетический анализ генофондной красной горбатовской породы на основе SNP-маркеров

РЕЗЮМЕ

Проведены сравнительные исследования происхождения красной горбатовской породы ($n=129$) с мировыми породами скота красного корня. При коэффициенте подобия $K=2$, животные искомой породы в наибольшей степени отличались от красного белорусского скота, голштинской черно- и красно-пестрой масти, красной датской (в том числе генофондной группы), однако были более схожими по геномным компонентам с красной степной и суксунской породами. При $K=4$ наблюдали наибольшую однородность групп красного горбатовского скота, а при $K=6-10$ отмечали сильную фрагментацию в виде комплексных генотипов с другими сравниваемыми породами. Установлено, что наибольшая частота кластеров гаплотипов в геноме животных была локализована на хромосоме 6 крупного рогатого скота для 6 сравниваемых пород красного корня (37196103–37698422 bp, детектируемый регион), а также на хромосоме 7 крупного рогатого скота для 6 сравниваемых пород (530447:1915174 bp, детектируемый регион). Анализ регионов генома по QTL показал, что выявленные разными методами гены ROH/Fst, hapflk/Fst и hapflk/ROH были связаны с жирнокислотным составом молока (включая конъюгированную ЖК), весом и размерами тела животных, среднесуточным привесом и уровнем потребления корма, площадью мышечного глазка, выходом жира и белка молока, показателями фертильности (трудности отела). При более детальном рассмотрении значений LD по породам и хромосомам на дистанциях 0–30 kb, 30–70 kb, 70–100 kb и 100–200 kb при $r^2 > 0,30$ были обнаружены пары SNP в долевым выражении, наиболее часто встречающиеся на хромосомах крупного рогатого скота (КРС) BTA6, BTA9, BTA14.

Ключевые слова: красный горбатовский скот, SNP-маркеры, гены, адмиксия, ROH, QTL, LD

Для цитирования: Недашковский И.С., Сермягин А.А., Нарышкина Е.Н., Абдельманова А.С., Зиновьева Н.А. Сравнительный популяционно-генетический анализ генофондной красной горбатовской породы на основе SNP-маркеров. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 133–141.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-133-141>

Comparative population-genetic analysis of the gene pool of the Red Gorbatov breed based on SNP markers

ABSTRACT

Comparative studies of the origin of the pool red Gorbatov breed ($n = 129$) with world breeds of red root cattle were conducted. With the similarity coefficient $K = 2$, animals of the desired breed differed to the greatest extent from the red Belarusian cattle, Holstein black and red-motley color, red Danish (including the gene pool group), but were more similar in genomic components to the red steppe and Suksun breeds. With $K = 4$, the greatest homogeneity of the red Gorbatov cattle groups was observed, and with $K = 6-10$, strong fragmentation in the form of complex genotypes with other compared breeds was noted. It was found that the highest frequency of haplotype clusters was localized on chromosome 6 of cattle for 6 compared red root breeds (37196103–37698422 bp, detectable region), as well as on chromosome 7 of cattle for 6 compared breeds (530447:1915174 bp, detectable region). Analysis of genome regions by QTL showed that the ROH/Fst, hapflk/Fst and hapflk/ROH genes identified by different methods were associated with the fatty acid composition of milk (including conjugated FA), body weight and size of animals, average daily weight gain and feed intake, eye muscle area, milk fat and protein yield, fertility indicators (calving difficulty). A more detailed examination of the LD values by breed and chromosomes at distances of 0–30 kb, 30–70 kb, 70–100 kb and 100–200 kb at $r^2 > 0.30$ revealed pairs of SNPs in fractional terms, most often found on the chromosomes of cattle BTA6, BTA9, BTA14.

Key words: red gorbatov breed, SNP-markers, genes, admixture, ROH, QTL, LD

For citation: Nedashkovsky I.S., Sermyagin A.A., Naryshkina E.N., Abdelmanova A.S., Zinovieva N.A Comparative population-genetic analysis of the gene pool of the Red Gorbatov breed based on SNP markers. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 133–141 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-133-141>

Введение/Introduction

Красные молочные породы КРС, распространенные на территории РФ, такие как красная степная, красно-пестрая и молочно-мясная красная горбатовская, являются ценным культурным и историческим достоянием и часто источником уникального генетического разнообразия. К примеру, в генотип красного горбатовского скота заложены исключительная жирность и белково-молочность, повышенный выход сухих веществ молока, хорошие удои при соблюдении условий кормления и содержания, приспособленность к разведению в зоне умеренного климата Центральной России. Отличительной особенностью этих животных считается необыкновенная устойчивость к возбудителям лейкоза, туберкулеза и бруцеллеза. Среди многих отечественных пород они отличаются от групп скота красного, черного и бурого корня повышенным числом уникальных аллелей в своем генотипе по разным системам генотипирования (группы крови, белки молока, STR-и SNP-маркирование) [1].

Красно-пестрая порода превосходит симментальскую по удою на 1500 кг молока, по морфо-функциональным свойствам вымени и при этом не уступает ей по качеству и технологическим свойствам молока, живой массе, мясным свойствам и качеству кожевенного сырья [2].

Животные красно-степной породы отлично переносят жару и периодические летние засухи, обладают крепким иммунным статусом, устойчивостью к неблагоприятным воздействиям внешней среды, отличаются долголетием, хорошей воспроизводительной способностью и отсутствием в генотипе летальных мутаций [3].

Однако им трудно конкурировать по удою с другими, более продуктивными молочными породами, такими как голштинская и черно-пестрая. Повышение конкурентоспособности красных молочных пород путем ускорения их генетического улучшения, а также сохранения ценного аллелофонда с помощью геномных методов может быть многообещающей стратегией для обеспечения их долгосрочного будущего. Для многих красных пород создание достаточно большой референтной популяции для получения геномного прогноза племенной ценности часто невозможно, но может быть преодолено путем добавления особей из других пород красного корня [4, 5].

Родство между ними во многом определяет выгоду объединения ряда пород в единую референтную популяцию для разработки общей селекционной программы. В связи с этим изучение генетической структуры популяции красных пород скота России, в частности красной горбатовской, отнесенной к группе генофондных пород скота, для целей ее дальнейшего сохранения и проведения оценки генотипа животных представляется актуальным [6].

Так, на примере исследования европейских ученых было изучено родство между 6 голландскими

породами крупного рогатого скота красного корня — groningenской белоголовой (Groningen White Headed), голландской фризской (Dutch Friesian), маас-рейн-эйссельской (Meuse-Rhine Yssel), голландской опоясанной (Dutch Belted), темно-красной (Deep Red) и голландским скотом, улучшенным красно-пестрым голштинским (Improved Red), с акцентированием основного внимания эффективному числу сегментов на хромосомах для уточнения, какие из данных пород могут выиграть от включения животных других пород в референтную базу.

Стоит заметить, что все изученные породы, за исключением маас-рейн-эйссельской, находятся под высоким риском исчезновения. Результаты показали высокую изменчивость эффективного числа сегментов на хромосомах, особенно в диапазоне от ~3500 до ~17 400 пар нуклеотидов (п. н.), что указывает на разные уровни родства между породами. В частности, важными оказались два кластера в геноме, один из которых отмечен для маас-рейн-эйссельской, голландской фризской и улучшенной красно-пестрой, а другой — для голландской фризской и голландского опоясанного скота [7, 8].

В совместных исследованиях отечественных и зарубежных ученых по изучению генофонда бестужевской, суксунской и красной горбатовской пород на основе применения полногеномных данных и поиска регионов в геноме, подверженных повышенному селекционному давлению, отмечено, что при расстоянии 0–30 kb достоверные различия ($p < 0,001$) по средним значениям LD (linkage disequilibrium, неравновесное сцепление генов) наблюдались для группы пород: голштинской красно-пестрой масти и красной горбатовской (0,303–0,317), бестужевской (0,275), суксунской (0,251). Для красной горбатовской породы имело место улучшение голштинским скотом ввиду наличия общих сегментов в геноме. Бестужевский скот наравне с суксунским при анализе величины LD между SNP (Single nucleotide polymorphism, однонуклеотидный полиморфизм) на хромосомах образовывал обособленные генетические группы. Вариабельность показателя LD была невысокой в геноме животных суксунской породы. Эффективный размер численности популяций для изученных пород был наибольшим для бестужевской ($n = 113$) и суксунской ($n = 84$) пород и наименьшим — для красной горбатовской ($n = 79$) [9].

В исследованиях, проведенных авторами ранее при рассмотрении молочной продуктивности коров красной горбатовской породы разных генотипов, отмечено, что прилитие крови англеской породы положительно отразилось на увеличении МДЖ (массовой доля жира) в молоке коров до 4,47%. Скрещивание с красной датской породой способствовало увеличению молочной продуктивности до уровня 5000–5200 кг молока (до 5774 кг по максимальной лактации). Результаты

дисперсионного анализа указывали на высокое достоверное влияние улучшающей породы ($\eta = 12,98\%$, $p \geq 0,999$) и быка-отца ($\eta = 5,09\%$, $p \geq 0,999$) для признаков молочной продуктивности. На признак МДЖ и МДБ высокое достоверное влияние оказали кровность по улучшающей породе ($\eta = 6,85\text{--}6,12\%$, $p \geq 0,999$) и бык-отец ($\eta = 4,43\text{--}4,93\%$, $p \geq 0,999$) [10].

Таким образом, можно заключить, что животные красной горбатовской породы наравне с англеской и красной датской могут быть использованы в формировании референтной группы красного скота [11].

В прошлых исследованиях авторов были идентифицированы кластеры в геноме на BTA9 (*bos taurus* autosome, аутосома крупного рогатого скота) и BTA22, влияющие на изменчивость содержания пальмитиновой и миристиновой жирных кислот в молоке коров красной горбатовской породы, на BTA20 — для пальмитиновой, миристиновой и олеиновой жирных кислот, на BTA25 — для пальмитиновой, миристиновой, стеариновой и олеиновой жирных кислот. Были обнаружены общие ассоциации, не зависящие от длины цепи жирных кислот и локализованные на хромосоме BTA25. Группа насыщенных, ненасыщенных жирных кислот и трансизомеров была ассоциирована с локусами количественных признаков (QTL, quantitative trait loci) на BTA8 (кроме ненасыщенных и полиненасыщенных жирных кислот), BTA18 (кроме мононенасыщенных жирных кислот), BTA20 (кроме полиненасыщенных жирных кислот) и BTA25. Для показателей миристиновой жирной кислоты установлены гены, образующие локусы количественных признаков на хромосомах BTA1, 3, 17, 22, 25, 29: *ERG*, *LRR8D*, *RAPGEF2*, *TEX264*, *AUTS2*, *LIMK1*, *STT3A*, *ACRV1*, для короткоцепочечных жирных кислот — на хромосомах BTA1, 13: *PCOLCE2*, *ATRN*, для среднецепочечных жирных кислот — на BTA25: *HS3ST2*, для трансизомеров — на хромосомах BTA11, 20, 24: *POLE4*, *C1QTNF3*, *CTNND2*, *DSG2*. Следует обратить внимание на то, что для всех типов жирных кислот и трансизомеров определен участок QTL на хромосоме BTA25 — *LIMK1* и *AUTS2*. Аннотация генов показала сопряженность их с признаками выхода молочного белка (*LRR8D*), удоя и скорости доея (*LRR8D*, *CTNND2*), с пигментацией в области глаз (*ATRN*), количеством соматических клеток в молоке (*C1QTNF3*), восприимчивостью к туберкулезу, содержанием пентадециловой кислоты в молоке и уровнем тироксина (*CTNND2*), а также с количеством кальция в молоке (*HS3ST2*) [12].

Цель данного исследования — сравнительный популяционно-генетический анализ структуры генофондной красной горбатовской породы в сравнении со скотом красного корня российского и зарубежного происхождения на основе скрининга

полиморфизмов SNP-маркеров, полученных в результате генотипирования по технологии биочипов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

С использованием биочипа Illumina 50K v3 средней плотности (Illumina, США) были прогенотипированы 129 голов коров красной горбатовской породы стада генофондного хозяйства ООО «Абабковское» (Нижегородская обл., Россия, 2023–2024 гг.).

Сравнительный анализ проведен с породами КРС красный белорусский скот ($n = 20$), голштинской черно-пестрой ($n = 17$) и красно-пестрой масти ($n = 4$), красной датской ($n = 6$) (в том числе генофондной группы), красной степной ($n = 29$) и суксунской ($n = 7$).

Образцы были депонированы на базе уникальной научной установки (УНУ) «Банк генетического материала животных и птиц» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста.

Выделение ДНК из исследуемых образцов проводили по стандартным протоколам производителя оборудования. Генотипирование проводили на сканере биочипов iScan System (Illumina, США), функционирующем в ЦКП «Биоресурсы и биоинженерия сельскохозяйственных животных» ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Среднее качество генотипирования составило 99,3% при вариации от 95,2 до 99,8%, что показало хороший уровень созданной исследовательской базы данных генотипов коров.

Контроль качества SNPs (редактирование генетической базы) проводили с помощью программного обеспечения Plink 1.9 (США) в среде программирования RStudio [13].

Поиск генов-кандидатов, локализованных в области идентифицированных SNP, осуществляли по базе данных NCBI¹ со сборкой генома *Bos_taurus_UMD_3.1.1*. Для поиска QTL и регионов под давлением отбора на хромосомах скота, имеющих сопряженность с функциональными характеристиками животных, использовали базу данных CattleQTLdb [14]. Геномная кластеризация была изучена с использованием программного обеспечения Admixture v1.3 (США) [15] и визуализирована с помощью пакета R pophelper².

Для поиска следов селекции в исследованных породах использовали следующие методы: расчет значений F_{st} при попарном сравнении пород, оценку островков (паттернов) гомозиготности (ROH), перекрывающихся у разных пород, и анализ гаплотипов с помощью программы hapFLK [16]. В программе Plink 1.9 были рассчитаны попарные значения генетических дистанций между всеми SNP на основании F_{st} для каждой пары пород, а также проведена оценка ROH .

¹ National Center for Biotechnological Information.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

² <https://www.cog-genomics.org/plink/>

В качестве локусов, наиболее вероятно подвергшихся селекции (давлению искусственного отбора), были приняты 0,1% SNP с максимальными значениями *F_{st}*, как было предложено Kijas и соавт. (2012) [17]. В результате теста hapFLK были получены значения отклонений частот SNP от нейтральной модели и визуализированы с помощью R-пакета qqman [18].

Для выявления генов-кандидатов в областях генома, подвергающихся предполагаемому давлению селекции, была использована информация о хромосомной локализации регионов, обнаруженных с помощью трех различных статистических методов: *F_{st}*, ROH (в программе Plink 1.9)³, hapFLK⁴. Приоритет был отдан тем областям, которые перекрывались и были обнаружены как минимум двумя разными методами.

Для оценки гаплотипического разнообразия в выборку к исследуемым породам были включены генотипы особей, полученные на аналогичных биочипах, бестужевской (*n* = 27) и бурой швицкой (*n* = 20) пород.

Оценку неравновесия по сцеплению осуществляли в программе Plink 1.9 по каждой хромосоме согласно алгоритму --chr «1...29» --r2--ld-window 10000--ld-window-kb 10000--ld-window-r20. В качестве сравнения при анализе LD в выборку были включены данные по генотипам белоголовой украинской породы (*n* = 11) (Illumina 50K v2, Illumina) из генофондного банка ВНИИГРЖ (ЦКП «Генетическая коллекция спермы крупного рогатого скота отечественных и зарубежных пород»⁵).

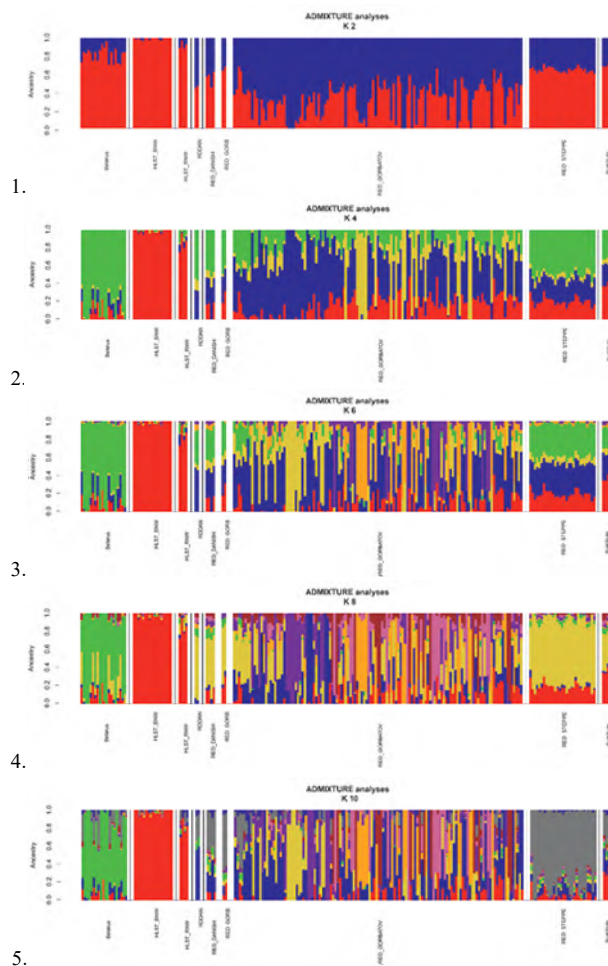
Результаты и обсуждение / Results and discussion

Проведено тестовое сравнительное изучение происхождения выборки особей из группы животных красной горбатой породы в сравнении с известными породами скота красного корня (рис. 1). Животные голштинской породы черно-пестрой масти добавлены к группе коров красного корня при проведении адмиксии для научного задела и оценивая доли участия их компонент в рассматриваемых геномах. Визуализация адмиксии показывает долю генетических компонент каждой группы, входящей в анализ относительно всех групп, то есть тонкой полосой на рисунке 1 показано каждое животное изучаемой выборки с цветами, характерными для каждой породы при различных коэффициентах подобия (вариантах разложения на группы). В данном случае это при коэффициентах подобия *K* = 2, *K* = 4, *K* = 6, *K* = 8, *K* = 10.

В настоящем анализе адмиксии 9 пород, и, соответственно, при максимальном рассматриваемом коэффициенте подобия *K* = 10 наблюдаем возможное включение компонент исследуемых пород в каждом конкретном образце (животном)

Рис. 1. Результаты анализа адмиксии по выборке скота красной горбатой породы в сравнении с рядом мировых и российских пород красного корня (красного белорусского скота, голштинской черно- и красно-пестрой масти, красной датской (в том числе генофондной группы), красной степной и суксунской): 1 — при коэффициенте подобия *K* = 2; 2 — при *K* = 4; 3 — при *K* = 6; 4 — при *K* = 8; 5 — при *K* = 10. Соответствие цветов геномным компонентам пород при *K* = 10: зеленый — красный белорусский скот; красный — голштинская порода; серый — красная степная; темно-синий — красная горбатая; фиолетовый, желтый, оранжевый, бордовый, синий, розовый — геномные компоненты, характерные для различных семейств внутри красной горбатой породы

Fig. 1. Results of admixture analysis for a sample of red Gorbato cattle in comparison with a number of world and Russian red root breeds (red Belarusian cattle, Holstein black and red-mottled, red Danish (including the gene pool group), red steppe and Suksun): 1 — with a similarity coefficient of *K* = 2; 2 — at *K* = 4; 3 — at *K* = 6; 4 — at *K* = 8; 5 — at *K* = 10. Color correspondence to the genomic components of breeds at *K* = 10: green — red Belarusian cattle; red — Holstein breed; gray — red steppe; dark blue — red Gorbato; purple, yellow, orange, burgundy, blue, pink are the genomic components characteristic of various families within the Red Gorbato breed



с возможным присутствием еще какой-либо другой компоненты (*K* = 10), не участвующей в исследовании.

Анализ адмиксии показал, что при коэффициенте подобия *K* = 2 животные искомой породы в наибольшей степени отличались от красного белорусского скота, голштинской черно- и

³ <https://forge-dga.jouy.inra.fr/projects/hapflk>

⁴ <https://vniigen.ru/ckpkrs/>

⁵ <https://forge-dga.jouy.inra.fr/projects/hapflk>

красно-пестрой масти, красной датской (в том числе генофондной группы), однако были более схожими по геномным компонентам с красной степной и суксунской породами. При $K = 4$ наблюдали наибольшую однородность групп красного горбатого скота, а при $K = 6-10$ отмечали сильную фрагментацию в виде комплексных генотипов с другими сравниваемыми породами (что действительно может указывать на использование красной датской, голштинской и отчасти англерской пород для улучшения скота красной степной и суксунской породы) с выделением отдельных групп особей, формирующих уникальное происхождение.

Во всяком случае по данному анализу можно судить о том, что искомая популяция отличается от групп красных пород скота Западной Европы и Северной Европы, а также от отечественных локальных популяций. Это свидетельствует, что полученные данные в первичном изучении могут говорить о целесообразности их использования в дальнейшей селекционно-племенной работе.

Проведено тестовое определение регионов в геноме, находящихся под давлением искусственного отбора на основе различных методов поиска (F_{st} , hapFLK, ROH) для группы красных пород скота, на расширенной выборке животных с использованием бурой швицкой породы (BRSW, $n = 22$) в качестве группы сравнения. Получены результаты сканирования поиска локусов, находящихся под давлением отбора, на основе различий в частотах гаплотипов (hapflk) между российскими популяциями — породами скота красного корня с учетом их иерархической структуры в общей выборке.

Установлено, что наибольшая частота кластеров гаплотипов в геноме была локализована на хромосоме 6 КРС для 6 сравниваемых пород красного корня (37196103–37698422 bp, детектируемый регион), а также на хромосоме 7 КРС для 6 сравниваемых пород (530447:1915174 bp, детектируемый регион) (рис. 2, 3). Частота кластера гаплотипов обозначает распространенность определенной группы схожих гаплотипов (гаплогруппы) в популяции. Она показывает, какая доля животных в определенной выборке имеет этот набор гаплотипов, что позволяет делать выводы о

Рис. 2. Результаты сканирования генома на наличие локусов, находящихся под давлением отбора, на основе различий в частотах гаплотипов между популяциями красных пород скота

Примечание: цветовое кодирование локусов использовано для контрастной визуализации и не несет дополнительной смысловой нагрузки.

Fig. 2. Results of genome scanning for loci under selection pressure based on differences in haplotype frequencies between populations of red cattle breeds

Note: color coding of loci is used for visual contrast and does not carry any additional semantic meaning.

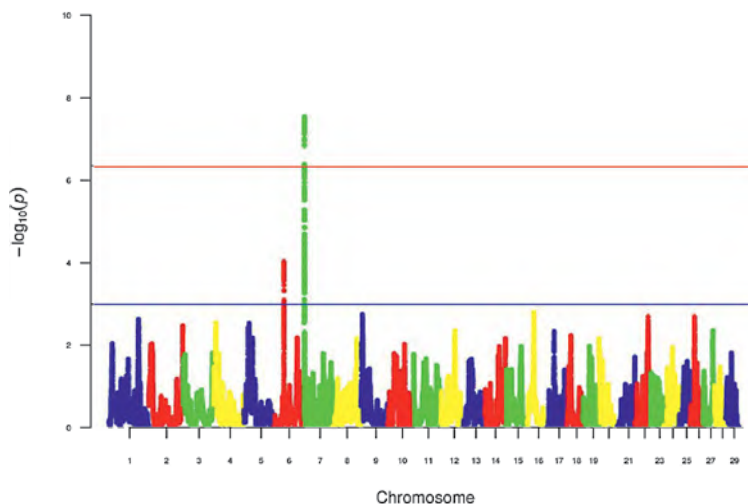
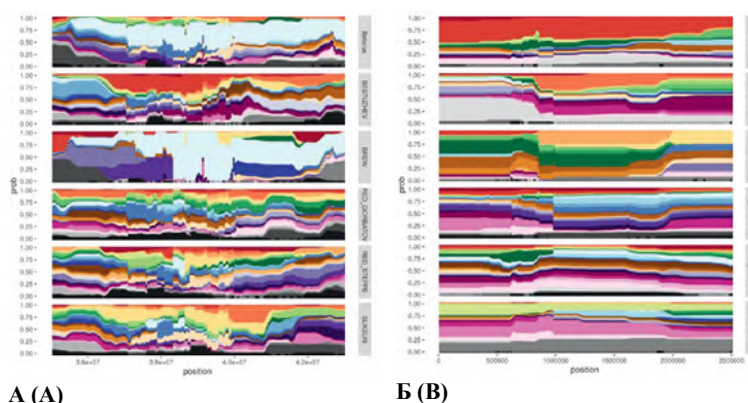


Рис. 3. Частоты кластеров гаплотипов на хромосоме 6 КРС для 6 сравниваемых пород (красного белорусского скота, бестужевской, бурой швицкой — группа сравнения, красной горбатой, красной степной, суксунской): А — на BTA6, Б — на BTA7. Ось X — позиции на хромосоме, ось Y — доля животных с одинаковым гаплотипом

Примечание: для обеспечения наглядности каждый уникальный гаплотип в конкретном локусе маркирован контрастным цветом. Цветовое кодирование локусов использовано для контрастной визуализации и не несет дополнительной смысловой нагрузки.

Fig. 3. Frequencies of haplotype clusters on cattle chromosome 6 for 6 compared breeds (red Belarusian cattle, Bestuzhevskaya, brown Shvitskaya — comparison group, red Gorbatoyskaya, red steppe, Suksunskaya): A — for BTA6, B — for BTA7. The X axis is the position on the chromosome, the Y axis is the proportion of animals with the same haplotype.

Note: for clarity, each unique haplotype at a particular locus is marked with a contrasting color. The color coding of loci is used for contrast visualization and does not carry additional semantic load.



родстве и особенно истории популяций. Одним цветом обозначены доли одинаковых для животных гаплотипов в каждой группе, соответственно, если гаплотипы разные, то и цвета разные в каждом конкретном месте на хромосоме, то есть на примере хромосомы 6 (BTA6) видно, что у бурой швицкой породы на участке от $3.8e + 07$ до $4.0e + 07$ почти 100% особей имеют одинаковый гаплотип (светло-голубой цвет).

При сравнении российских красных пород (красной горбатовской, красной степной, суксунской) с красным белорусским скотом были выявлены гены U6 и RNF130, локализованные на 16 и 7 хромосомах, соответственно, связанные с регуляцией процессов сплайсинга транскриптов и апоптоза клеток. При сравнении красной белорусской породы с бурой швицкой дополнительно выявлены гены BROX, DISP1, CAPN2, NCAPG, локализованные на 16 и 6 хромосомах и связанные с нормальным развитием эмбриональных структур, размерами тела, регуляцией клеточного цикла и митоза.

Сравнение российских красных пород с бурой швицкой, кроме вышеперечисленных генов, дополнительно выявило гены SYT10, DBX2, NELL2, LAP3 и LYN, локализованные на 5, 6 и 14 хромосомах, связанные с регуляцией секреции дофамина и восприятием запахов, процессами регуляции транскрипции, фертильностью, протеолизом в клетках, размерами тела (табл. 1).

Анализ регионов генома по QTL показал, что выявленные разными методами гены ROH/Fst, hapflk/Fst и hapflk/ROH были связаны с жирнокислотным составом молока (включая конъюгированную ЖК), весом и размерами тела животных, среднесуточным привесом и уровнем потребления корма, площадью мышечного глазка, выходом жира и белка молока, показателями фертильности (трудности отела).

На основе паттернов гомозиготности (ROH, runs of homozygosity) была проведена оценка суммарной их длины и количества для ряда красных пород скота России (включая красную горбатовскую) и Беларуси (красный белорусский скот) (рис. 4).

Наибольшая величина ROH при разной длине паттернов (от 0–2 до > 16 Mb) была показана для бестужевской, далее — красной горбатовской и суксунской пород. При этом наименьшие значения получены для животных красной степной породы (в сравнительном аспекте с бурой швицкой). Для красного белорусского скота отмечены наименьшие значения величины гомозиготности, что можно связать с

Таблица 1. Результаты, полученные на основе базы данных Ensembl BioMart, для каждой геномной области с детектированными следами селекции (отбора) разными методами при сопоставлении в разных парах пород красного корня и контрольной группы (бурная швицкая, красный белорусский скот)

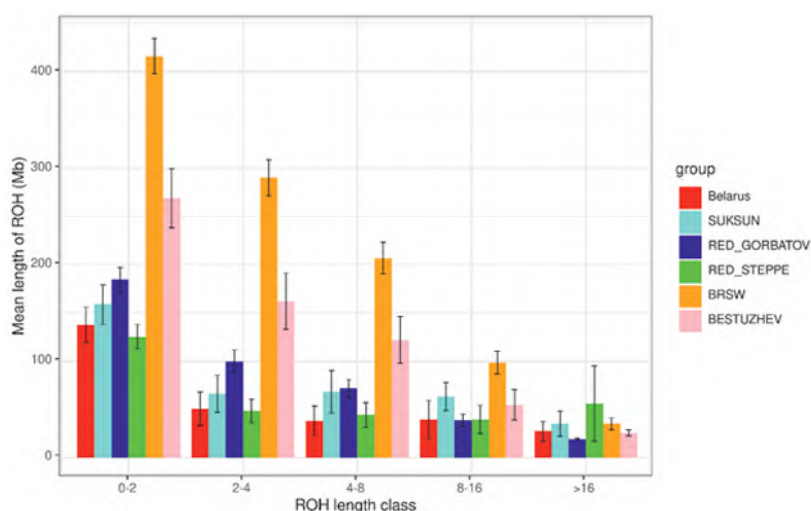
Table 1. Results obtained from the Ensembl BioMart database for each genomic region with detected traces of selection by different methods when compared in different pairs of red root breeds and the control group (Brown Swiss, Red Belarusian)

Породы	ROH/Fst		hapflk/Fst		hapflk/ROH	
	локализация в геноме ^a	gene name ^b	локализация в геноме ^a	gene name ^b	локализация в геноме ^a	gene name ^b
BRSW_RG	6:37,14–37,16	LAP3		–	6:37,27–37,37	NCAPG
	16:26,29–26,52	DISP1		–	16:43,32–43,32	U6
	16:27,07–27,13	CAPN2				
BEL_BRSW	16:26,20–26,22	BROX		–	6:37,27–37,37	NCAPG
	16:26,29–26,52	DISP1		–	16:43,32–43,32	U6
	16:27,07–27,13	CAPN2		–		–
BEL_RG		–		–	16:43,32–43,32	U6
BEL_RS		–	7:11,84–13,62	RNF130	16:43,32–43,32	U6
BEL_SK		–	7:11,84–13,62	RNF130	16:43,32–43,32	U6
BEL_BST		–	7:11,84–13,62	RNF130		–

Примечание: ^a — локализация в геноме представлена в следующем формате: номер хромосомы: начало гена — конец гена, в Мб (chr:start gene — end gene); ^b — официальное обозначение гена, обычно представляющее собой краткую форму названия гена, утвержденное согласно Vertebrate Gene Nomenclature Committee; BRSW — бурная швицкая, RG — красная горбатовская, RS — красная степная, SK — суксунская, BST — бестужевская породы, BEL — красный белорусский скот.

Рис. 4. Распределение паттернов гомозиготности (ROH) по их суммарной длине в геноме в среднем на одно животное для КРС красных пород России и Беларуси: Belarus — красный белорусский скот, SUKSUN — суксунская, RED_GORBATOV — красная горбатовская, RED_STEPPE — красная степная, BRSW — бурная швицкая, BESTUZHEV — бестужевская; ROH length class — размерность класса паттернов гомозиготности; Mean length of ROH (Mb) — длина паттерна гомозиготности в Мб

Fig. 4. Distribution of homozygosity patterns (ROH) by their total length in the genome on average per animal for cattle of red breeds of Russia and Belarus: Belarus — red Belarusian cattle, SUKSUN — Suksunskaya, RED_GORBATOV — red Gorbatskovskaya, RED_STEPPE — red steppe, BRSW — brown Shvitskaya, BESTUZHEV — Bestuzhevskaya; ROH length class — the dimension of the homozygosity pattern class; Mean length of ROH (Mb) — the length of the homozygosity pattern in megabases

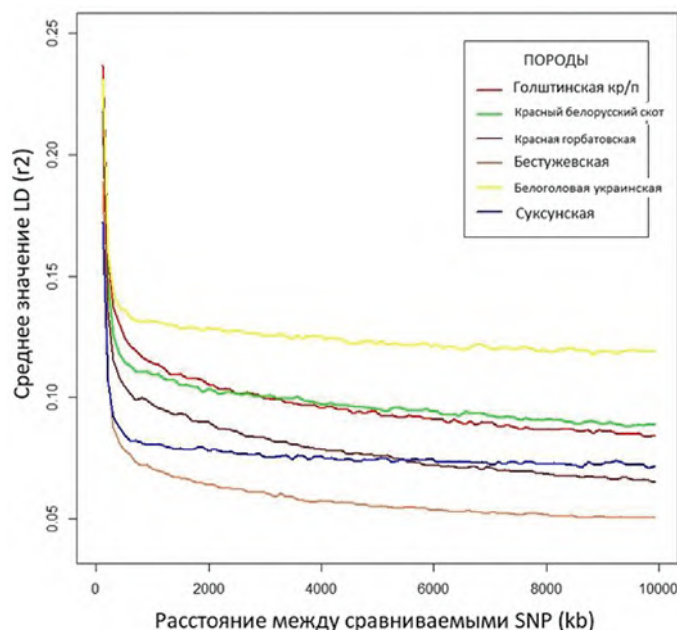


возможным активным использованием на маточном поголовье англеских и красных датских быков.

При увеличении расстояния между маркерами от 30–70 kb 100–200 kb происходит дифференциация каждой из породных групп, за исключением голштинов красно-пестрой масти, что указывает на идентичный характер сцепления для SNP пар (рис. 5).

Рис. 5. Разложение неравновесия по сцеплению между SNP для пород красного скота: голштинская кр/п — голштинская порода красно-пестрой масти

Fig. 5. Decomposition of the linkage disequilibrium between SNPs for red cattle breeds: Holstein red-mottled — Holstein breed of red-mottled color



Начиная с дистанции 200 kb по LD, отмечен независимый характер распределения значений по породам. При более детальном рассмотрении значений LD по породам и хромосомам на дистанциях 0–30 kb, 30–70 kb, 70–100 kb и 100–200 kb при $r^2 > 0,30$ были обнаружены пары SNP в доле-вом выражении, наиболее часто встречающиеся на ВТА6, ВТА9, ВТА14.

Графическое представление разложения неравновесия по сцеплению между однонуклеотидными полиморфизмами позволяет оценить, с одной стороны, величину накопления инбридинга в популяции, с другой — дать характеристику эффективному размеру численности данной популяции [19]. Так, включенная как группа сравнения белоголовая украинская порода показала наибольшие средние значения LD, что свидетельствует о тесном сцеплении между SNP и вероятном, более высоком значении инбридинга в изученной выборке животных. В свою очередь, для красной горбатовской породы были получены

схожие значения LD с суксунской, что может говорить о среднем уровне инбридинга и улучшении их трансграничными породами скота красного корня (кроссбридинге, предположительно путем скрещивания с англеской и красной датской породами).

Наименьшая величина LD была получена для выборки бестужевской породы, что указывает на сравнительно низкую инбридированность популяции и более высокий эффективный размер ее численности для поддержания генетического разнообразия. При этом для красной горбатовской породы размер популяции, как и для суксунской, находился в пределах нормального воспроизводства для контроля оптимального уровня инбридинга при разведении.

Выводы/Conclusions

Проведенный сравнительный популяционно-генетический анализ генофондной красной горбатовской породы на основе SNP-маркеров показал, что в целом породе свойственна аллельная специфичность, и она отличается от групп красных пород скота Западной Европы и Северной Европы, а также от отечественных локальных популяций. Отмечено, что на хромосоме 6 и 7 КРС пород красного корня локализуется наибольшая частота кластеров гаплотипов. Анализ по локусам количественных признаков показал, что выявленные гены были связаны с жирнокислотным составом молока и показателями молочной продуктивности, показателями фертильности и экстерьера.

Дальнейшее исследование генофондной красной горбатовской породы с использованием современных методов анализа привнесет существенный вклад в сохранение и дальнейшее развитие в селекционном плане уникальной по своей генетической структуре отечественной породы, что является на сегодняшний момент основной задачей исходя из актуальной повестки продовольственной безопасности.

Полученные результаты лягут в основу создания единой референтной популяции скота красного корня России и Беларуси.

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 проведены при поддержке Российского научного фонда за счет средств гранта № 23-46-10002.

FUNDING

The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation using grant funds No. 23-46-10002.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Сермягин, А.А., Турбина И.С., Фролова Е.М., Блинова И.Н., Тодуа Д.В., Зиновьева Н.А. Породы мира: красная горбатовская. *Молочное и мясное скотоводство*. 2021; (8): 11.
- Дунин И.М. Породы мира: красно-пестрая. *Молочное и мясное скотоводство*. 2021; (2): 28
- Горлов И.Ф. Породы мира: красная степная. *Молочное и мясное скотоводство*. 2024; (3): 39.
- van Breukelen A.E., Doekes H.P., Windig J.J., Oldenbroek K. Characterization of Genetic Diversity Conserved in the Gene Bank for Dutch Cattle Breeds. *Diversity*. 2019; 11(12): 229. <https://doi.org/10.3390/d11120229>
- Gurgul A. *et al.* Diversifying selection signatures among divergently selected subpopulations of Polish Red cattle. *Journal of Applied Genetics*. 2019; 60(1): 87–95. <https://doi.org/10.1007/s13353-019-00484-0>
- Нарышкина Е.Н., Сермягин А.А., Лашнева И.А., Недашковский И.С. Селекционно-генетические параметры признаков молочной продуктивности коров красной горбатовской породы разных генотипов. *Животноводство и кормопроизводство*. 2025; 108(2): 60–73. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-2-60>
- Marjanovic J., Hulsege B., Calus M.P.L. Relatedness between numerically small Dutch Red dairy cattle populations and possibilities for multibreed genomic prediction. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(4): 4498–4506. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19573>
- Schmidtman C. *et al.* Assessing the genetic background and genomic relatedness of red cattle populations originating from Northern Europe. *Genetics Selection Evolution*. 2021; 53: 23. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00613-6>
- Сермягин А.А., Доцев А.В., Абдельманова А.С., Турбина И.С., Селкнер И., Зиновьева Н.А. Поиск отпечатков селекции в геноме генофондных пород крупного рогатого скота красного корня России. *Молочное и мясное скотоводство*. 2022; (3): 10–15. <https://doi.org/10.33943/MMS.2022.31.66.002>
- Нарышкина Е.Н., Сермягин А.А., Недашковский И.С., Лашнева И.А., Зиновьева Н.А. Молочная продуктивность коров красной горбатовской породы разных генотипов. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024; 116: 298–306. <https://elibrary.ru/zdorsx>
- Neumann G.B. *et al.* Genomic diversity and relationship analyses of endangered German Black Pied cattle (DSN) to 68 other taurine breeds based on whole-genome sequencing. *Frontiers in Genetics*. 2023; 13: 993959. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.993959>
- Нарышкина Е.Н. и др. Полногеномный анализ ассоциаций с жирнокислотным составом молока коров красной горбатовской породы. *Молочное и мясное скотоводство*. 2023; (6): 3–9. <https://doi.org/10.33943/MMS.2023.44.94.001>
- Chang C.C., Chow C.C., Tellier L.C.A.M., Vattikuti S., Purcell S.M., Lee J.J. Second-generation PLINK: rising to the challenge of larger and richer datasets. *GigaScience*. 2015; 4(1): s13742-015-0047-8. <https://doi.org/10.1186/s13742-015-0047-8>
- Hu Z.-L., Park C.A., Reedy J.M. Bringing the Animal QTLdb and CorrDB into the future: meeting new challenges and providing updated services. *Nucleic Acids Research*. 2022; 50(D1): D956–D961. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab1116>
- Alexander D.H., Novembre J., Lange K. Fast model-based estimation of ancestry in unrelated individuals. *Genome Research*. 2009; 19(9): 1655–1664. <https://doi.org/10.1101/gr.094052.109>
- Fariello M.I., Boitard S., Naya H., SanCristobal M., Servin B. Detecting Signatures of Selection Through Haplotype Differentiation Among Hierarchically Structured Populations. *Genetics*. 2013; 193(3): 929–941. <https://doi.org/10.1534/genetics.112.147231>
- Kijas J.W. *et al.* Genome-Wide Analysis of the World's Sheep Breeds Reveals High Levels of Historic Mixture and Strong Recent Selection. *PLoS Biology*. 2012; 10(2): e1001258. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001258>
- Turner S.D. qqman: an R package for visualizing GWAS results using Q-Q and manhattan plots. *Journal of Open Source Software*. 2018; 3(25): 731. <https://doi.org/10.21105/joss.00731>
- Jin H., Zhao S., Jia Y., Xu L. Estimation of Linkage Disequilibrium, Effective Population Size, and Genetic Parameters of Phenotypic Traits in Dabieshan Cattle. *Genes*. 2023; 14(1): 107. <https://doi.org/10.3390/genes14010107>

REFERENCES

- Sermyagin A.A., Turbina I.S., Frolova E.M., Blinova I.N., Todua D.V., Zinovieva N.A. Breeds of the world: Krasnaya Gorbatskovskaya. *Dairy and beef cattle farming*. 2021; (8): 11 (in Russian).
- Dunin I.M. Breeds of the world: red steppe. *Dairy and beef cattle farming*. 2021; (2): 28 (in Russian).
- Gorlov I.F. Breeds of the world Red steppe. *Dairy and beef cattle farming*. 2024; (3):39 (in Russian).
- van Breukelen A.E., Doekes H.P., Windig J.J., Oldenbroek K. Characterization of Genetic Diversity Conserved in the Gene Bank for Dutch Cattle Breeds. *Diversity*. 2019; 11(12): 229. <https://doi.org/10.3390/d11120229>
- Gurgul A. *et al.* Diversifying selection signatures among divergently selected subpopulations of Polish Red cattle. *Journal of Applied Genetics*. 2019; 60(1): 87–95. <https://doi.org/10.1007/s13353-019-00484-0>
- Naryshkina E.N., Sermyagin A.A., Lashneva I.A., Nedashkovsky I.S. Selection and genetic parameters of milk production traits in Red Gorbato cows of different genotypes. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2025; 108(2): 60–73 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-2-60>
- Marjanovic J., Hulsege B., Calus M.P.L. Relatedness between numerically small Dutch Red dairy cattle populations and possibilities for multibreed genomic prediction. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(4): 4498–4506. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19573>
- Schmidtman C. *et al.* Assessing the genetic background and genomic relatedness of red cattle populations originating from Northern Europe. *Genetics Selection Evolution*. 2021; 53: 23. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00613-6>
- Sermyagin A.A., Dotsev A.V., Abdelmanova A.S., Turbina I.S., Sölkner J., Zinovieva N.A. Selection signature scanning in the genome of Russian local Red cattle breeds. *Dairy and beef cattle farming*. 2022; (3): 10–15 (in Russian). <https://doi.org/10.33943/MMS.2022.31.66.002>
- Naryshkina E.N., Sermyagin A.A., Nedashkovsky I.S., Lashneva I.A., Zinovieva N.A. Milk productivity of different genotypes Red Gorbato cows. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024; 116: 298–306 (in Russian). <https://elibrary.ru/zdorsx>
- Neumann G.B. *et al.* Genomic diversity and relationship analyses of endangered German Black Pied cattle (DSN) to 68 other taurine breeds based on whole-genome sequencing. *Frontiers in Genetics*. 2023; 13: 993959. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.993959>
- Naryshkina E.N. *et al.* Genome-wide analysis associations for fatty acids composition in cow's milk of Red Gorbato breed. *Dairy and beef cattle farming*. 2023; (6): 3–9 (in Russian). <https://doi.org/10.33943/MMS.2023.44.94.001>
- Chang C.C., Chow C.C., Tellier L.C.A.M., Vattikuti S., Purcell S.M., Lee J.J. Second-generation PLINK: rising to the challenge of larger and richer datasets. *GigaScience*. 2015; 4(1): s13742-015-0047-8. <https://doi.org/10.1186/s13742-015-0047-8>
- Hu Z.-L., Park C.A., Reedy J.M. Bringing the Animal QTLdb and CorrDB into the future: meeting new challenges and providing updated services. *Nucleic Acids Research*. 2022; 50(D1): D956–D961. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab1116>
- Alexander D.H., Novembre J., Lange K. Fast model-based estimation of ancestry in unrelated individuals. *Genome Research*. 2009; 19(9): 1655–1664. <https://doi.org/10.1101/gr.094052.109>
- Fariello M.I., Boitard S., Naya H., SanCristobal M., Servin B. Detecting Signatures of Selection Through Haplotype Differentiation Among Hierarchically Structured Populations. *Genetics*. 2013; 193(3): 929–941. <https://doi.org/10.1534/genetics.112.147231>
- Kijas J.W. *et al.* Genome-Wide Analysis of the World's Sheep Breeds Reveals High Levels of Historic Mixture and Strong Recent Selection. *PLoS Biology*. 2012; 10(2): e1001258. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001258>
- Turner S.D. qqman: an R package for visualizing GWAS results using Q-Q and manhattan plots. *Journal of Open Source Software*. 2018; 3(25): 731. <https://doi.org/10.21105/joss.00731>
- Jin H., Zhao S., Jia Y., Xu L. Estimation of Linkage Disequilibrium, Effective Population Size, and Genetic Parameters of Phenotypic Traits in Dabieshan Cattle. *Genes*. 2023; 14(1): 107. <https://doi.org/10.3390/genes14010107>

ОБ АВТОРАХ

Игорь Сергеевич Недашковский¹

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом национального каталога
nedashkovsky_is@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0487-4576>

Александр Александрович Сермягин²

кандидат сельскохозяйственных наук, директор
alex_sermyagin85@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-2386-12>

Елена Николаевна Нарышкина¹

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заведующая отделом популяционной генетики и генетических основ разведения животных
selection.76@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3421-1653>

Александра Сергеевна Абдельманова¹

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией генетического мониторинга ресурсов сельскохозяйственных животных
preevetic@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>

Наталья Анатольевна Зиновьева¹

доктор биологических наук, профессор, академик Российской академии наук, директор
n_zinovieva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4017-6863>

¹Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, г. о. Подольск, Московская обл., 142132, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Московское шоссе, 55А, Пушкин, Санкт-Петербург, 196601, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Igor Sergeevich Nedashkovsky¹

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of the National Catalog Department
nedashkovsky_is@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0487-4576>

Alexander Alexandrovich Sermyagin²

Candidate of Agricultural Sciences, Director
alex_sermyagin85@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-2386-1289>

Elena Nikolaevna Naryshkina¹

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Population Genetics and Genetic Foundations of Animal Breeding
selection.76@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3421-1653>

Alexandra Sergeevna Abdelmanova¹

Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Genetic Monitoring of Farm Animal Resources
preevetic@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4752-0727>

Natalia Anatolyevna Zinovieva¹

Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director
n_zinovieva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4017-6863>

¹L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132, Russia

²Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding — Branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,

55A Moskovskoe shosse, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russia

Подпишитесь на печатные выпуски «АГРАРНОЙ НАУКИ» с любого месяца и на любой срок

» В РЕДАКЦИИ по тел. +7 (495) 777-67-67, доб. 1453, по agrovetpress@inbox.ru

» В АГЕНТСТВЕ ПОДПИСКИ
ООО «Урал-Пресс Округ»
<https://www.ural-press.ru/catalog/>

» БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА
НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ
на отраслевом портале
<https://agrarnayanauka.ru/rassylka-zhurnala/>

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



Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

✉ artemdysin@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.07.2025

Одобрена после рецензирования: 11.09.2025

Принята к публикации: 26.09.2025

© Дысин А.П., Баркова О.Ю.

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding — Branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Pushkin, Saint Petersburg, Russia

✉ artemdysin@mail.ru

Received by the editorial office: 05.07.2025

Accepted in revised: 11.09.2025

Accepted for publication: 26.09.2025

© Dysin A.P., Barkova O.Yu.

Молекулярно-генетические и эпигенетические механизмы регуляции мясной продуктивности у кур: современные данные об эпигенетических, метаболических и породных особенностях

РЕЗЮМЕ

Современное птицеводство сталкивается с необходимостью повышения мясной продуктивности, что требует фундаментального понимания молекулярно-генетических и эпигенетических механизмов регуляции роста. Настоящий обзор посвящен анализу современных данных о молекулярно-генетических и эпигенетических механизмах, регулирующих мясную продуктивность у кур. Акцент сделан на ключевых генах (GHR, MSTN, GNPDA2, LDB2, KPNA3), их роли в развитии мышечной ткани, метаболизме и влиянии факторов окружающей среды. Обобщены результаты транскриптомных исследований, демонстрирующих различия в экспрессии генов между промышленными бройлерами и местными породами, а также роль эпигенетических модификаций в адаптации к стрессовым условиям и питанию. Показано, что селекция на быстрый рост сопряжена с активацией анаболических путей (IGF-1, PI3K/Akt), но увеличивает риск мышечных миопатий. Профили экспрессии в грудной мышце, мышцах ног и гипоталамусе отражают тканеспецифичность регуляции роста. Обзор подчеркивает необходимость учета генетического разнообразия и эпигенетической пластичности при селекции, а также перспективность применения мультиомных подходов для повышения эффективности птицеводства. Рассмотренные данные создают перспективу для разработки инновационных стратегий, направленных на оптимизацию роста, качества мяса и адаптации птиц к меняющимся условиям среды, которые включают углубленно изучение взаимодействия генов, разработку маркер-ориентированных программ селекции и применением нутриэпигеномики.

Ключевые слова: мясная продуктивность птицы, генетическая регуляция роста, эпигенетические факторы, экспрессия генов, местные и промышленные породы кур

Для цитирования: Дысин А.П., Баркова О.Ю. Молекулярно-генетические и эпигенетические механизмы регуляции мясной продуктивности у кур: современные данные об эпигенетических, метаболических и породных особенностях. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 142–158.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-142-158>

Molecular genetic and epigenetic mechanisms of regulation of meat productivity in chickens: recent findings on epigenetic, metabolic and breed features

ABSTRACT

The contemporary poultry production industry is confronted with the imperative to enhance meat productivity, a goal that necessitates a comprehensive grasp of the molecular, genetic, and epigenetic mechanisms governing growth regulation. This review analyzes current data on molecular genetic and epigenetic mechanisms regulating meat production in chickens. The study places particular emphasis on key genes (GHR, MSTN, GNPDA2, LDB2, KPNA3), exploring their roles in muscle tissue development, metabolism, and the influence of environmental factors. The results of transcriptomic studies demonstrating differences in gene expression between commercial broilers and local breeds, as well as the role of epigenetic modifications in adaptation to stressful conditions and nutrition, are summarized. The present study demonstrates that selection for accelerated growth is associated with the activation of anabolic pathways (IGF-1, PI3K/Akt), yet concomitantly increases the risk of developing muscular myopathies. As shown, the expression profiles observed in the pectoral and leg muscles, as well as in the hypothalamus, indicate the tissue-specific nature of growth regulation. The review emphasizes the necessity of considering genetic diversity and epigenetic plasticity in breeding programs and the potential of multi-omics approaches to enhance the efficiency of poultry production. The data reviewed here provide a basis for developing innovative strategies to optimize growth, meat quality, and bird adaptation to changing environmental conditions. Such strategies may include an in-depth study of gene interactions, the development of marker-assisted breeding programs, and the application of nutriepigenomics. This paper examines the molecular genetic and epigenetic mechanisms regulating meat productivity in chickens, focusing on current data concerning epigenetic, metabolic, and breed-specific factors.

Key words: meat yield of poultry, genetic regulation of growth, epigenetic factors, gene expression, local and commercial chicken breeds

For citation: Dysin A.P., Barkova O.Yu. Molecular genetic and epigenetic mechanisms of regulation of meat productivity in chickens: recent findings on epigenetic, metabolic and breed features. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 142–158 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-142-158>

Введение/Introduction

Современное птицеводство играет ключевую роль в обеспечении глобальной продовольственной безопасности, предоставляя доступные источники высококачественного белка [1–5]. Растущий мировой спрос на птицеводческую продукцию стимулирует разработку и внедрение инновационных подходов, направленных на повышение показателей роста, мясной продуктивности и адаптационных способностей птиц [5–6].

Эти подходы основаны на углубленном изучении генетической архитектуры продуктивных признаков. Однако достигнутые успехи выявили значительные пробелы в понимании молекулярных механизмов регуляции роста и их взаимодействия с метаболическими и эпигенетическими факторами [10]. В связи с этим актуальным становится комплексное исследование генетических, молекулярных и эпигенетических процессов, определяющих фенотипические проявления роста у кур [11, 12].

Изучение профилей экспрессии генов является важным инструментом для раскрытия молекулярных механизмов, лежащих в основе фенотипических характеристик. Анализ экспрессии генов в различных тканях и условиях выращивания позволяет идентифицировать ключевые регуляторы роста, метаболизма и мышечного развития, которые напрямую влияют на мясную продуктивность [13–16]. Среди них особое значение имеют гены, связанные с соматотропной осью, такие как рецептор гормона роста (GHR) и инсулиноподобный фактор роста 1 (IGF-1), а также негативные регуляторы мышечной массы, например миостатин (MSTN) [17, 18]. Современные данные подчеркивают важность других генов, включая GNPDA2 (глюкозамин-6-фосфат деаминаза 2) и членов семейства LDB, которые регулируют гликолиз, энергетический гомеостаз и развитие мышечной ткани [19, 20].

Цели данного обзора — обобщение и анализ современных данных о молекулярно-генетических и эпигенетических механизмах, определяющих мясную продуктивность у кур, с акцентом на идентификацию ключевых генов, их роли в регуляции роста и развития мышечной ткани, а также на влиянии эпигенетических модификаций, породных особенностей и внешних факторов, таких как питание и стресс.

Рассматривая профили экспрессии генов, их регуляцию и влияние эпигенетических механизмов, авторы стремились предоставить всесторонний анализ того, как эти факторы формируют рост и развитие мышечной ткани у птицы. Эти знания необходимы для разработки инновационных подходов к селекции и управлению, направленных на повышение эффективности производства мяса при сохранении здоровья и благополучия животных.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Для подготовки настоящего литературного обзора использовали электронные базы данных PubMed, Scopus, Web of Science и Google Scholar. Поиск выполняли с использованием ключевых слов и комбинаций терминов, таких как «генетическая регуляция роста кур», «молекулярные механизмы мясной продуктивности», «эпигенетические факторы в птицеводстве», а также названий конкретных генов (GHR, MSTN, GNPDA2, INTS6, LDB2, KPNA3). В обзор были включены оригинальные исследования, обзорные статьи и монографии, опубликованные с 1996 года по настоящее время.

Для повышения объективности проведения обзора отбор и анализ публикаций выполняли два автора с последующим обсуждением и разрешением разногласий.

Систематизированные данные были сгруппированы по тематическим направлениям: молекулярно-генетические основы регуляции роста, эпигенетические механизмы, влияние питания и окружающей среды, породная и тканевая специфичность экспрессии генов. Такой подход позволил создать интегрированную картину современных достижений в области исследования роста домашней птицы и определить перспективные направления для дальнейших исследований и практического применения в птицеводстве.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Гены

GHR

Ген рецептора гормона роста (GHR) играет центральную роль в регуляции роста, метаболизма и общего здоровья у кур, выступая ключевым посредником в передаче сигналов гормона роста (GH). Как трансмембранный белок, GHR связывается с GH, активируя внутриклеточные сигнальные каскады, такие как путь JAK/STAT, которые способствуют анаболическим процессам, включая рост мышц и костей, а также поддерживают энергетический гомеостаз [21]. Вариации в гене GHR, такие как мутации и полиморфизмы, существенно влияют на фенотипические признаки, включая массу тела, размер тела и темпы роста, что делает его важным объектом для исследований в птицеводстве. Многочисленные исследования демонстрируют, что изменения в этом гене могут приводить к выраженным фенотипическим эффектам, подчеркивая его критическую роль в физиологии птиц.

Одним из наиболее изученных примеров является мутация у сцепленных с полом карликовых кур (SLD), которая представляет собой рецессивную делецию в гене GHR, приводящую к синтезу укороченного рецептора, не способного эффективно связывать GH [21]. Это вызывает значительное снижение роста и массы тела у

таких кур, что подчеркивает важность функционального GHR для нормального развития. В дополнение к мутациям полиморфизмы в гене GHR демонстрируют связь с вариациями в мясной продуктивности. Так, Khaerunnisa *et al.* (2017) выявили, что полиморфизм g.565G > A в гене GHR ассоциирован с улучшенными показателями живой массы, массы туши, массы грудных и бедренных мышц у кур Kampung и бройлеров, что указывает на его потенциал как маркера для селекционных программ, направленных на повышение мясной продуктивности [22].

Сложность регуляции GHR проявляется и в его способности транскрибироваться в двух направлениях, продуцируя как сенсорный транскрипт (GHR-S), так и антисмысловой транскрипт (GHR-AS), которые частично комплементарны и взаимодействуют друг с другом. Xu *et al.* (2019) показали, что экспрессия GHR-AS увеличивается в процессе дифференциации миобластов, способствуя этому процессу через активацию сигнального пути GH-GHR-IGF1. Сверхэкспрессия GHR-AS приводит к повышению экспрессии маркеров дифференциации, таких как MyoD и MyHC, и одновременно подавляет миграцию миобластов, что подчеркивает его роль в развитии мышечной ткани — ключевого аспекта мясной продуктивности [23]. Это дополняет данные Khaerunnisa *et al.* (2017), говоря о том, что GHR влияет на мышечную массу не только через структурные полиморфизмы, но и через регуляторные транскрипты.

Факторы питания модулируют экспрессию GHR и, соответственно, мясную продуктивность. Yenice *et al.* (2023) обнаружили, что добавление метионина в рацион бройлеров увеличивает экспрессию GHR в печени, что коррелирует с улучшенным приростом массы тела и выходом грудной мышцы. Это указывает на взаимосвязь между питанием и генетической регуляцией роста, где метионин выступает дополнительным фактором, усиливающим эффекты GHR [24].

Мутации в GHR также влияют на метаболизм липидов, что имеет значение для мясной продуктивности. Chen *et al.* (2021) показали, что у SLD кур с мутацией GHR наблюдается повышенное отложение абдоминального жира, связанное с изменениями в экспрессии генов SOCS2 и CISH, которые регулируют липидный обмен. Сверхэкспрессия этих генов способна подавлять избыточное накопление липидов, что указывает на их потенциальную роль в коррекции нежелательных эффектов мутации GHR [25]. Эти данные дополняют выводы Yang *et al.* (2022), которые, изучая нокдаун и сверхэкспрессию GHR *in vitro*, показали, что дефицит GHR усиливает экспрессию генов дифференциации жира (PPAR γ , FAS), тогда как его избыточная экспрессия подавляет липогенез и улучшает митохондриальную функцию, снижая перекисное окисление липидов.

Таким образом, GHR оказывает комплексное влияние на баланс между мышечной и жировой

тканью. Полиморфизмы в гене GHR связаны и с другими фенотипическими признаками, имеющими косвенное значение для мясной продуктивности. Yang *et al.* выявили полиморфизм rs3138025 в гене GH, ассоциированный с длиной кия у кур Wenshang Barred, и полиморфизм rs313810945 в гене IGF2, связанный с шириной и глубиной груди, что отражает интегрированную роль сигнального пути GH-GHR-IGF в формировании скелетно-мышечной структуры [26]. Хотя эти полиморфизмы непосредственно не затрагивают GHR, они подчеркивают его место в общей регуляторной сети роста. В то же время Kazemi *et al.* (2018) обнаружили связь полиморфизмов GHR с количеством и массой яиц у кур Mazandaran, что указывает на многофункциональность гена, влияющего как на мясные, так и на репродуктивные признаки [27]. Таким образом, экспрессия и функциональность гена GHR являются критическими для мясной продуктивности кур, определяя рост, развитие мышц и метаболизм.

Знания о полиморфизмах открывают возможности для селекции, направленной на улучшение мышечной массы, в то время как взаимодействие GHR с питательными факторами, такими как метионин, позволяет оптимизировать продуктивность через управление рационом. Вместе с тем влияние GHR на липидный обмен требует учета при разработке стратегий селекции, чтобы минимизировать нежелательное отложение жира. Дальнейшие исследования молекулярных механизмов действия GHR и его взаимодействия с другими генами и сигнальными путями могут способствовать созданию более эффективных подходов к повышению мясной продуктивности в птицеводстве.

IGF-1

Ген инсулиноподобного фактора роста (IGF-1) занимает центральное место в регуляции роста и развития у кур, существенно влияя на их мясную продуктивность. Современные исследования демонстрируют, что экспрессия IGF-1 связана с такими ключевыми аспектами, как рост мышц, аппетит, иммунная функция и генетические вариации, что в совокупности определяет эффективность производства мяса у бройлеров.

Одним из важных направлений исследований является влияние IGF-1 на аппетит и регуляцию питания, что непосредственно связано с приростом массы тела. Fujita *et al.* (2019) показали, что интрацеребровентрикулярное введение белка IGF-1 значительно снижает потребление корма у бройлеров, активируя проопиомеланокортин и фосфорилирование АКТ в гипоталамусе, при этом не влияя на экспрессию орексигенных нейропептидов NPY и AgRP. Интересно, что порог анорексии, вызванной IGF-1, у бройлеров оказался выше, чем у несушек, что может объяснять гиперфагию бройлеров и их способность к интенсивному росту [28].

Chen *et al.* (2018) установили, что добавление бетаина в рацион (500 или 1000 мг/кг) повышает экспрессию IGF-1 и активирует путь mTOR, что улучшает прирост массы тела и развитие грудной мышцы у бройлеров [29]. Аналогично Wen *et al.* (2017) показали, что высокие уровни метионина увеличивают концентрацию IGF-1 и рост грудной мышцы у быстрорастущих бройлеров посредством активации пути ERK [30]. Эти исследования подчеркивают синергизм между питанием и генетическим фоном в регуляции IGF-1, что открывает перспективы для изучения диетических аспектов. В дополнение к регуляции аппетита IGF-1 влияет на иммунную систему и рост, что отражается на мясной продуктивности.

Salehizadeh *et al.* (2019) обнаружили, что пробиотики на основе молочнокислых бактерий увеличивают экспрессию IGF-1 в печени бройлеров, что коррелирует с улучшением прироста массы тела, конверсии корма и усилением гуморального иммунитета [31]. Это исследование дополняет данные Fujita *et al.* (2019), показывая, что внешние факторы, такие как диетические добавки, могут модулировать экспрессию IGF-1, усиливая как рост, так и устойчивость организма, что в конечном итоге повышает продуктивность.

Генетические вариации в системе IGF играют важную роль в определении мясной продуктивности. Sinpru *et al.* (2021) изучили влияние генотипов гена гормона роста (GH) и IGF-1 на рост кур породы Korat и показали, что генотип A1A1 гена GH связан с более высокой массой тела на всех стадиях роста, тогда как генотипы IGF-1 не оказывали значительного влияния на гетерозис [32]. В то же время Hosnedlova *et al.* (2020) выявили значимые ассоциации между полиморфизмами гена TGFβ3 и массой тела на 21-й, 28-й и 35-й дни, а также с характеристиками туши, такими как убойный выход, хотя полиморфизмы IGF-1 и IGFBP2 не показали подобных эффектов. Эти данные указывают на то, что влияние IGF-1 может быть контекстно зависимым, а его взаимодействие с другими генами, такими как GH или TGFβ3, требует учета при селекции [33].

Guo *et al.* (2023) выявили полиморфизмы в генах IGFBP2, IGFBP3 и IGFBP5, связанные с массой тела и развитием мышц, причем IGFBP3 ингибирует пролиферацию, но способствует дифференциации миоцитов [34]. El-Attrouny *et al.* (2020) обнаружили, что порода Benha line с высокой экспрессией IGF-1 в печени и мышцах демонстрирует лучшие показатели роста по сравнению с другими породами, что делает IGF-1 потенциальным маркером для селекции продуктивных линий [35]. Однако Nurcahya *et al.* (2020) показали, что полиморфизмы IGF-2 не влияют на рост у кур SKKedu и KeduSK, что указывает на различия в значимости IGF-1 и IGF-2 в зависимости от породы и контекста [36].

На клеточном уровне IGF-1 стимулирует рост мышц, что является основой мясной продуктивности. Yu *et al.* (2015) продемонстрировали, что

экзогенный IGF-1 значительно усиливает пролиферацию миоцитов у эмбрионов кур через активацию сигнального пути PI3K/Akt, повышая экспрессию миогенных факторов, таких как MyoD и Myf5 [37]. Эти результаты согласуются с данными Saneysu *et al.* (2016), которые показали, что с возрастом уровни mPHK IGF-1 и фосфорилирование Akt/S6 в грудной мышце бройлеров снижаются, что указывает на возрастное подавление синтеза белка [38]. Таким образом, IGF-1 играет ключевую роль в раннем миогенезе, но его влияние ослабевает со временем, что важно учитывать при определении оптимального возраста убоя.

Экспрессия гена IGF-1 является ключевым фактором мясной продуктивности у кур, влияя на рост мышц, аппетит и иммунную функцию.

GNPDA2

Ген GNPDA2 (глюкозамин-6-фосфатдеаминаза 2) кодирует фермент, участвующий в метаболизме углеводов, и всё чаще признается ключевым регулятором энергетического гомеостаза у кур. Этот ген играет важную роль в преобразовании глюкозамин-6-фосфата в фруктозо-6-фосфат и аммиак, что является частью метаболического пути, влияющего на обмен глюкозы. Накопленные данные свидетельствуют о его значимости для поддержания энергетического баланса, что напрямую связано с массой тела, отложением жира и ростовыми характеристиками, особенно у промышленных бройлеров. Исследования как на людях, так и на животных подчеркивают связь GNPDA2 с метаболическими процессами, а у кур вариации в его экспрессии ассоциируются с различиями в этих признаках.

Сравнительные анализы транскриптомов демонстрируют, что экспрессия GNPDA2 варьирует между разными линиями кур. Например, у быстрорастущих бройлеров уровни экспрессии в жировой ткани и печени значительно выше, чем у медленнорастущих несушек, что коррелирует с увеличением массы тела и отложением жира [39]. Тканеспецифическая экспрессия гена также играет важную роль: полноразмерный транскрипт GNPDA2 преимущественно обнаруживается в жировой ткани, гипоталамусе и двенадцатиперстной кишке [19]. Интересно, что голодание снижает экспрессию GNPDA2 в гипоталамусе на 58,8%, но после повторного кормления она возвращается к норме. Диета с высоким содержанием глюкозы и жиров увеличивает экспрессию в жировой ткани почти в два раза по сравнению с контрольной группой, что указывает на чувствительность гена к энергетическому статусу и питанию [19].

Хотя текущая совокупность исследований подтверждает роль GNPDA2 в регуляции энергетического метаболизма и роста у кур, необходимы дальнейшие функциональные исследования для выяснения точных механизмов, посредством

которых данный ген влияет на гликолитический поток и анаболические процессы. Такие исследования могут включать манипулирование экспрессией GNPDA2 *in vitro* с использованием первичных культур миобластов кур или *in vivo* с помощью трансгенных подходов. Эти исследования будут иметь решающее значение для разработки целевых стратегий разведения и для подтверждения GNPDA2 как надежного маркера в программах селекции с использованием маркеров.

MSTN

Член суперсемейства трансформирующего фактора роста бета (TGF- β) миостатин (MSTN) является общепризнанным отрицательным регулятором роста мышц. Его функция заключается в подавлении пролиферации и дифференциации миобластов, что ограничивает образование мышечных волокон и, соответственно, общую мышечную массу. Снижение экспрессии MSTN или функциональные мутации приводят к значительному увеличению мышечной массы — феномену, известному как «двойная мускулатура». Механизм действия MSTN хорошо изучен: он подавляет ключевые миогенные регуляторные факторы, такие как MYOD1 и MYOG, препятствуя миогенной дифференциации и ограничивая формирование мышечных волокон [40].

McPherron *et al.* (1997) впервые продемонстрировали, что нарушение работы MSTN вызывает резкий рост массы скелетных мышц у коров [40]. Эти наблюдения были актуальны и для других пород КРС, у которых мутации MSTN ассоциировались не только с увеличением мышечной массы, но и с улучшенной конверсией корма, что обеспечивало более быстрый рост при меньшем потреблении пищи [41]. Снижение экспрессии MSTN стабильно коррелирует с увеличением гипертрофии мышечных волокон и общим ростом. Этот процесс делает MSTN важной мишенью для генетических и эпигенетических манипуляций, направленных на усиление мышечного роста.

У кур аналогичные закономерности выявлены в линиях, отобранных для высокой массы тела. Такие особи демонстрируют более низкие уровни транскриптов MSTN по сравнению с медленнорастущими линиями.

Современные исследования, включая анализы РНК-секвенирования, подтвердили обратную зависимость между уровнями мРНК MSTN и темпами роста мышц у кур. Kim *et al.* (2022) показали, что у бройлеров, отличающихся быстрым ростом, соотношение изоформ Mstn-B к Mstn-A в мышцах выше, чем у несушек, что связано с большей площадью поперечного сечения мышечных волокон и общей гипертрофией мышц [42]. Изоформа Mstn-B, подавляя антимيوгенную активность Mstn-A, способствует увеличению мышечной массы, что подтверждается и в обзоре Lee *et al.* (2024), где подчеркивается стабильно более высокое соотношение изоформ B и A у бройлеров,

несмотря на отсутствие последовательного снижения общей экспрессии MSTN по сравнению с несушками [43].

Эти данные дополняются результатами Xu *et al.* (2022), которые, нокаутировав MSTN в миобластах куриных эмбрионов, выявили дифференциальную экспрессию генов, связанных с дифференциацией и энергетическим метаболизмом, включая активацию сигнальных путей MAPK и PI3K/Akt, известных своей ролью в эффектах MSTN у млекопитающих [44]. Ren *et al.* (2024) уточняют, что MSTN активирует путь ERK1/ERK2 MAPK, негативно регулируя дифференциацию миоцитов, и демонстрируют возможность модуляции его экспрессии внешними факторами, такими как лютеин, что открывает перспективы для новых подходов к кормлению [45].

Влияние MSTN на мясную продуктивность зависит и от генетического фона и условий выращивания. Yousefi *et al.* (2024) установили, что у бройлеров Cobb экспрессия MSTN в грудной мышце ниже, чем у Ross и Arian, что коррелирует с их более высокой массой тела и улучшенными показателями роста, подчеркивая роль генетической вариации [46]. В то же время Kumaravel *et al.* (2023) выявили, что диета с 21%-ным содержанием белка снижает экспрессию MSTN у кур Aseel, улучшая прирост массы и конверсию корма, что согласуется с выводами Ren *et al.* (2024) о питательной модуляции MSTN [47]. Однако Lee *et al.* (2024) отмечают, что стрессовые факторы, такие как высокая температура или плотность посадки, могут повышать экспрессию MSTN, снижая рост, что подчеркивает необходимость оптимизации условий содержания [43]. Malila *et al.* (2022) добавляют, что у быстрорастущих кур с возрастом проявляются признаки мышечных аномалий, таких как белые полосы, сопровождаемые изменением экспрессии генов, включая MSTN, что указывает на потенциальные компромиссы между ростом и качеством мышц [48].

Таким образом, MSTN остается ключевой мишенью для генетического улучшения в птицеводстве, а новые данные об изоформах, сигнальных путях и методах редактирования генома открывают пути для создания устойчивых линий кур с улучшенными показателями роста и продуктивности при условии дальнейших исследований для минимизации рисков.

Семейство LDB

LDB (белок, связывающий домен LIM) функционирует как адаптерный белок, который облегчает сборку транскрипционных регуляторных комплексов путем связывания с факторами транскрипции, содержащими домен LIM. Эта роль хорошо известна в системах млекопитающих [49, 50], и новые данные теперь указывают на то, что LDB2 актуален для домашней птицы. В частности, исследования демонстрируют значимость генов этого семейства для экспрессии и регуляции

процессов, связанных с развитием скелетных мышц у кур, что имеет важное значение для мясной продуктивности.

Недавние работы выявили ключевые особенности экспрессии генов семейства LDB у птиц. Например, Wei *et al.* (2020) впервые описали 31-bp индел в гене LDB2, основываясь на анализе 2797 особей из 10 различных пород кур. Этот индел приводит к появлению генотипов II, ID и DD, среди которых генотип DD оказался доминирующим. Ассоциативный анализ популяции F2, полученной от скрещивания кур пород Gushi (GS) и Anka, показал, что особи с генотипом DD обладают значительно более высокими показателями массы тела по сравнению с генотипом ID. Кроме того, экспрессия гена LDB2 в разных породах кур оказалась значительно выше в грудных и ножных мышцах по сравнению с другими тканями. У кур породы GS уровень экспрессии в грудной мышце варьировался на разных стадиях развития, достигая максимума на 6-й неделе, а у кур Ross 308 наблюдались значительные различия в экспрессии LDB2 в грудных мышцах между генотипами. Таким образом, полиморфизм в LDB2 не только влияет на фенотипические характеристики, но и модулирует экспрессию гена в мышечной ткани, что подчеркивает его потенциал как маркера для селекционных программ [20].

Wei *et al.* (2024) затронули другой член семейства — ген *LDB3*, который известен как белок Z-полосы, специфичный для поперечнополосатых мышц, и играет важную роль в развитии скелетных мышц млекопитающих, хотя его функции у птиц до сих пор изучены недостаточно. Они провели многократный анализ данных RNA-секвенирования 1415 образцов из 21 ткани кур, доступных в базе NCBI GEO, и выявили три варианта LDB3 (LDB3-X, LDB3-XN1 и LDB3-XN2), образующихся в результате альтернативного сплайсинга в скелетных мышцах. Функциональные исследования *in vitro* и *in vivo* показали, что сплайс-изомеры этого белка выполняют различные роли в скелетных мышцах. В частности, через взаимодействие с белками IGF2BP1 и MYHC они способствуют пролиферации и дифференциации миоцитов у кур, регулируя тем самым миогенез [51].

Эпигенетическая регуляция генов, связанных с ростом кур

Эпигенетические механизмы, такие как метилирование ДНК, модификации гистонов и активность некодирующих РНК, играют важнейшую роль в регуляции экспрессии генов у кур, не затрагивая последовательность их ДНК. Эти процессы обладают высокой чувствительностью к факторам окружающей среды и способны влиять на фенотипические признаки, такие как масса тела и развитие мышц [52].

В птицеводстве экспериментальные данные свидетельствуют о том, что введение пребиотиков

и синбиотиков на стадии инкубации (*in ovo*) может вызывать значительные эпигенетические изменения в развивающемся эмбрионе. Например, Dunislawska *et al.* (2020) исследовали воздействие синбиотика (комбинации пребиотика, такого как галактоолигосахариды или олигосахариды семейства раффинозы, с пробиотическими штаммами *Lactobacillus salivarius* или *Lactobacillus plantarum*) на бройлерные яйца. Их работа показала, что подобное раннее вмешательство не только изменяет состав кишечной микробиоты, но и приводит к масштабным изменениям эпигенетического ландшафта в тканях-мишенях, таких как печень.

Используя методы бисульфитного секвенирования с уменьшенным представителем (RRBS) и количественной ПЦР для анализа экспрессии микроРНК, исследователи выявили глобальные сдвиги в структуре метилирования ДНК и уровнях экспрессии ряда микроРНК. В частности, они отметили изменения метилирования в промоторных областях генов-регуляторов метаболизма, таких как *ANGPTL4* и *NR4A3*, которые играют ключевую роль в липидном обмене и энергетическом гомеостазе. Эти изменения коррелировали с улучшением показателей роста и эффективности кормления [53]. Sikorska *et al.* (2021) дополнили эти результаты, показав, что введение синбиотиков *in ovo* способно перепрограммировать профили микроРНК в печени, влияя на экспрессию микроРНК, связанных с ростом и стрессовыми реакциями. Это указывает на то, что ранняя модуляция экспрессии микроРНК может формировать долговременную молекулярную память, воздействующую на генные регуляторные сети вплоть до взрослого возраста [54].

Dunislawska *et al.* (2023) подтвердили, что манипуляции с кишечной микробиотой посредством пребиотиков *in ovo* изменяют паттерны метилирования ДНК в определенных CpG-сайтах генов, связанных с развитием мышц, иммунной функцией и метаболизмом питательных веществ, в тканях кишечника и печени [55]. Эти изменения сопровождались сдвигами в профилях экспрессии микроРНК, что, как предполагается, позволяет точно настраивать транскрипционные реакции, необходимые для оптимального роста. В новейших исследованиях данных авторов использовали мультиомические подходы, сочетающие транскриптомику и эпигеномику, чтобы показать долгосрочное влияние синбиотиков на сети регуляции генов. Они выявили, что инъекции синбиотиков (PoultryStar®) и холина на 12-й день инкубации яиц вызывают значительные изменения в экспрессии генов в цекальных миндалинах и слизистой цекума у кур, причем эти эффекты проявляются как в межгенерационном, так и в трансгенерационном аспектах [56]. В частности, в цекальных миндалинах наблюдался значительный трансгенерационный эффект в поколении F3 после снижения активности в F2, тогда как

в слизистой цекума преобладали межгенерационные изменения в поколении F2, с менее выраженными, но сохраняющимися эффектами в F3, особенно в группе с однократной инъекцией синбиотика. Эти данные подчеркивают тканеспецифичность и динамику эпигенетических модификаций, демонстрируя, что биоактивные соединения способны вызывать устойчивые изменения в регуляции генов, передаваемые через поколения.

Alagawany *et al.* (2022) в обзоре по нутриэпигеномике отметили, что питательные вещества и нутрицевтики, включенные в рацион птиц, могут усиливать экспрессию генов, связанных с метаболизмом, ростом, иммунитетом и антиоксидантной активностью, подчеркивая роль нутригеномики в изучении влияния питания на генную экспрессию и нутригенетики в оценке реакции организма на биоактивные компоненты пищи в зависимости от генетического профиля. Тем самым интегративные исследования, объединяющие транскриптомные и эпигеномные данные, показывают, что эпигенетические изменения работают совместно с генетическим отбором, формируя как фенотипическую, так и поведенческую эволюцию кур [57]. Например, Yu *et al.* (2024) обнаружили, что метилирование m6A регулирует экспрессию генов CUBN, MEGF10, BOP1 и BMPR2, которые играют ключевую роль в развитии грудной мышцы и отложении внутримышечного жира (IMF) у кур породы Jingyuan на разных стадиях роста (42, 126 и 180 дней), причем эти гены демонстрируют стадийно-специфические различия в экспрессии во время дифференциации миобластов и преадипоцитов, что делает их потенциальными кандидатами для улучшения мясной продуктивности через целенаправленные эпигенетические и генетические вмешательства [58].

Понимание эпигенетической регуляции генов, связанных с ростом кур, открывает новые возможности для совершенствования стратегий разведения птицы. Управляя условиями окружающей среды, чтобы добиться полезных эпигенетических изменений, селекционеры могут улучшить показатели роста и жизнестойкости кур без изменения их генетической структуры. Этот подход может дополнить традиционные методы генетической селекции, обеспечивая более целостный подход к птицеводству.

Различия профилей экспрессии у промышленных бройлеров и местных пород

Достижения в области высокопроизводительной транскриптомики позволили исследователям раскрыть различные профили экспрессии генов в породах кур с расходящимися историями селекции. Сравнительный анализ последовательно показывает, что промышленные бройлеры и местные породы демонстрируют заметно отличающиеся транскрипционные ландшафты, которые отражают их специализированные черты роста и продуктивности.

Промышленные бройлеры

Промышленные бройлеры были селективно выведены для быстрого роста и высокого выхода мышечной массы, что привело к значительным транскриптомным изменениям. Эти интенсивно отобранные птицы демонстрируют надежную регуляцию генов, участвующих в мышечной гипертрофии, энергетическом обмене веществ и соматотропной оси, при этом сигнализация IGF-1 играет центральную роль в регуляции роста и метаболизма [59]. В частности, такие гены, как IGF-1 и его рецептор GHR, экспрессируются на более высоких уровнях у бройлеров по сравнению с несушками или местными породами, что подчеркивает заметное различие в регуляторных генных сетях, лежащих в основе роста мышц [60].

Эта повышенная экспрессия анаболических генов коррелирует с усиленным синтезом белка, ускоренной пролиферацией миобластов и увеличением мышечной массы, что способствует исключительной массе тела, достигаемой промышленными бройлерами. Более того, недавнее исследование показало, что промышленные бройлеры обладают транскрипционной сигнатурой, обогащенной путями, связанными с гликолизом и окислительным фосфорилированием (OXPHOS), особенно в тканях скелетных мышц [61]. Эти метаболические адаптации необходимы для быстрого роста и высокой эффективности корма. Однако эти же данные свидетельствуют о том, что этот быстрый рост создает нагрузку на систему окислительного метаболизма, которая может подавлять систему OXPHOS, вызывая дисфункцию митохондрий [61].

Более того, сравнительные исследования между современными и наследственными линиями бройлеров показывают, что селективное разведение не только усилило экспрессию генов, связанных с ростом мышц, но и изменило метаболические профили. Например, Kong *et al.* (2017) обнаружили, что у современных бройлеров линии Ross 308 по сравнению с неотобранной линией Barred Plymouth Rock наблюдается более низкая экспрессия генов, кодирующих митохондриальные белки, что указывает на сниженное содержание митохондрий в мышцах современных бройлеров [62]. Это может быть связано с изменениями в типах мышечных волокон и эффективностью роста, поскольку современные бройлеры демонстрируют активацию путей, связанных с быстрым ростом и мышечной гипертрофией, таких как сигнализация PDGF и ответ на окислительный стресс, опосредованный NFE2L2. Кроме того, регуляторные факторы, такие как MSTN, фоллиостатин (FST) и PRKAG3, играют ключевую роль в миогенезе и метаболизме питательных веществ, что подчеркивает генетические адаптации, направленные на оптимизацию роста мышц и эффективности корма [63].

Дальнейшие исследования подтверждают наличие различий в профилях экспрессии генов

между разными промышленными линиями бройлеров. Jawasreh *et al.* (2019) показали, что в четырех промышленных линиях — Hubbard Classic, Cobb500, Ross308 и Indian River — наблюдаются различия в экспрессии факторов роста мышц, таких как MSTN и IGF-I, а также маркерных генов мышц MyoD и MyoG. В частности, линия Ross 308 демонстрирует наивысшую экспрессию MSTN, тогда как Indian River — наивысшую экспрессию IGF-I [64].

Эти различия коррелируют с фенотипическими характеристиками, такими как масса тела, вес туши и качество мяса, что указывает на то, что селективное разведение целенаправленно формировало разные аспекты роста и продуктивности в различных линиях. Кроме того, исследования Lassiter *et al.* (2019) выявили связь между экспрессией генов в грудной мышце и кормовой эффективностью. Бройлеры с высокой кормовой эффективностью демонстрируют подавление экспрессии генов пути сигнализации миостатина и повышение экспрессии генов, способствующих образованию мышц и росту, что свидетельствует о генетической основе для улучшенного развития мышц и синтеза белка [65]. Это подчеркивает важность генетического отбора для оптимизации не только роста, но и эффективности использования корма — ключевого экономического показателя в птицеводстве.

Однако интенсивное разведение по скорости роста сопряжено с рисками для здоровья мышц. Yalcin *et al.* (2018) исследовали изменения экспрессии генов в грудной мышце в ответ на глубокую миопатию грудной мышцы у медленно- и быстрорастущих бройлеров. Они обнаружили, что индуцирование грудной миопатии приводит к увеличению площади мышечных волокон и изменению экспрессии генов, связанных с развитием сосудов (VEGFA) и регуляцией сокращения мышц (ACTA1, MYLK2, ATP2A1). Медленнорастущие бройлеры имеют более высокий базовый уровень экспрессии этих генов и больше капилляров, но развитие миопатии вызывает адаптивные ответы для повышения доступности кислорода и развития мышц [66]. Это указывает на то, что хотя современные бройлеры оптимизированы для быстрого роста, это может увеличивать их восприимчивость к мышечным расстройствам.

Таким образом, исследования демонстрируют сложное взаимодействие между генетическим отбором, экспрессией генов и фенотипом у промышленных бройлеров. Селективное разведение привело к повышению экспрессии генов, способствующих росту мышц и эффективности корма, но сопровождается потенциальными компромиссами в метаболической функции и здоровье мышц. Понимание этих механизмов критически важно для разработки устойчивых стратегий разведения и управления, которые оптимизируют продуктивность без ущерба для благополучия животных.

Местные породы

Местные породы кур обычно демонстрируют более сбалансированный фенотип, характеризующийся умеренными темпами роста и повышенной приспособленностью к местным условиям окружающей среды. Исследования подтвердили, что эти породы развили уникальные генетические адаптации, чтобы справляться со сложными условиями. Профили экспрессии их генов часто показывают отличительную комбинацию черт: хотя эти местные птицы не достигают экстремальной мышечной массы, как у промышленных бройлеров, они часто выражают лучшую реакцию на стресс и экспрессию метаболических генов, которые обеспечивают устойчивость в неоптимальных условиях выращивания. Например, исследование Izadnia *et al.* (2018) выявило, что у местных пород кур экспрессия генов в печени, связанных с метаболическими процессами, такими как метаболизм карбоновых кислот, и реакцией на стресс, значительно отличается от таковой у промышленных бройлеров. Анализ дифференциальной экспрессии показал, что 121 ген был сверхэкспрессирован, а 279 — подавлены у местных пород, причем многие из подавленных генов обогащены в количественных локусах признаков (QTL), связанных с эффективностью использования корма. Среди ключевых кандидатных генов, таких как RSAD2, IL15, LIPI, EGR1 и DUSP16, выделяются те, что могут влиять на остаточное кормление и рост, подчеркивая метаболические адаптации, способствующие выживанию в сложных условиях [67].

Эти метаболические особенности дополняются данными о генах, связанных с ростом мышц. Так, Chen *et al.* (2019) в своем исследовании кур Jinghai Yellow сравнили быстро- и медленнорастущие группы, выявив дифференциальную экспрессию генов в грудной мышце. У четырехнедельных особей в быстрорастущей группе были обнаружены 172 дифференциально экспрессированных гена у самцов и 31 — у самок, а у восьминедельных — 37 и 44 соответственно. Гены, такие как SNCG, MCL1, ARNTL, PLPPR4 и VAMP1, оказались связаны с пролиферацией и дифференциацией клеток, что указывает на различия в механизмах роста мышц между группами [68]. Эти находки иллюстрируют, что у местных пород, несмотря на более медленный рост, существуют уникальные генетические профили, обеспечивающие сбалансированное развитие мышечной ткани, в отличие от промышленных бройлеров, где акцент смещен на быстрый набор массы.

Важным аспектом устойчивости местных пород является их иммунная адаптация, что подчеркивает исследование Li *et al.* (2020). Сравнивая миникур Daweishan, полуселекционированных кур Wuding и промышленных бройлеров Avian, авторы обнаружили, что местные породы демонстрируют более высокую экспрессию генов защитных пептидов в кишечнике, особенно у Daweishan, что коррелирует с их ролью во врожденном

иммунитете как первой линии защиты. В то же время у бройлеров наблюдалась повышенная экспрессия этих генов в иммунных органах (селезенке, тимусе, бурсе), что связано с адаптивным иммунитетом. Интересно, что уровень экспрессии генов защитных пептидов отрицательно коррелировал с таковым для массы тела в кишечнике и положительно — в иммунных органах, демонстрируя различия в иммунных стратегиях между местными и промышленными породами [69]. Эти данные дополняют выводы Izadnia *et al.* (2018) об устойчивости местных пород, показывая, что их генетические адаптации охватывают не только метаболизм, но и иммунную защиту.

Таким образом, в отличие от промышленных бройлеров, у которых селекция направлена на максимальную мясную продуктивность, местные породы выделяются своей устойчивостью и приспособляемостью, что делает их ценным объектом для изучения генетических основ адаптации и потенциального улучшения пород. Эти данные подчеркивают важность комплексного подхода к анализу экспрессии генов мясной продуктивности кур, где рост, метаболизм и иммунитет взаимосвязаны и определяют общую жизнеспособность птицы в различных условиях.

Профили экспрессии в различных тканях

Грудная мышца

Грудная мышца является основным направлением в птицеводстве из-за ее высокой коммерческой ценности. Исследования экспрессии генов факторов роста в сателлитных клетках грудной мышцы и бедренной мышцы показывают, что такие факторы, как TGF- β 2, миостатин, активин-B, фоллистатин, IGF-II и bFGF, играют важную роль в регуляции пролиферации и дифференциации мышечных клеток. Например, Kosamis *et al.* (2000) выявили, что уровень мРНК TGF- β 2 значительно увеличивается через 48 часов культивирования и остается стабильным до 144 часов в культурах сателлитных клеток обеих мышц, что указывает на его участие в поздних стадиях дифференциации. В то же время экспрессия миостатина демонстрирует резкий всплеск в культуре клеток бедренных мышц на 72-м часу, отличаясь от более стабильного профиля в грудной мышце, что может отражать различия в метаболических потребностях этих мышц [70]. Отсутствие экспрессии IGF-I в этих культурах наряду со снижением IGF-II в бедренной мышце после 96 часов подчеркивает, что другие факторы роста, возможно, компенсируют их роль в развитии грудной мышцы у бройлеров.

Еще один уровень регуляции роста мышц обеспечивают микроРНК, как показали Zhang *et al.* (2020) в сравнении пород Sichuan mountainous black-bone и Dahan. Выявленные различия в экспрессии 32 микроРНК между этими породами, включая gga-miR-1a-3p и miR-204, демонстрируют их влияние на метаболизм жирных кислот и

сигнальные пути MAPK. В частности, miR-204, пониженная в DH, ингибирует MAP3K13, что может способствовать более быстрому росту мышц у этой породы за счет изменения сигнальных каскадов [71]. Эти данные дополняют транскриптомный анализ Zhang *et al.* (2017), где сравнение грудной мышцы кур Gushi и AA бройлеров выявило 1649 дифференциально экспрессируемых генов, включая те, что связаны с метаболизмом липидов (например, LPL, FABP5, PPARG), и гены развития мышц (MYL10, MYH7B) [72]. Повышенная экспрессия CETP у кур Gushi указывает на генетически обусловленные различия в накоплении липидов, влияющие на качество мяса.

Интенсивная селекция на рост, однако, сопряжена с побочными эффектами, такими как ранее обсуждаемые мышечные миопатии. Bordini *et al.* (2022) с помощью анализа коэкспрессии генов (WGCNA) выявили модули, связанные с шириной груди и содержанием белка, включая гены, участвующие в убиквитин-опосредованном протеолизисе, воспалительных реакциях и метаболизме коллагена (например, COL6A3, MMP2) [73]. Эти изменения указывают на метаболический стресс и нарушение структуры мышц, что подтверждается данными Mutryn *et al.* (2015) о дисфункции фокальной адгезии и окислительном стрессе [74]. В то же время Hu *et al.* (2020), изучая тибетских и пекинских кур, показали, что дифференциально экспрессируемые гены (например, CACNA1H, TGIF2) связаны с путями MAPK и TGF- β , что может отражать адаптацию к гипоксии, но подчеркивает разнообразие молекулярных механизмов роста мышц в разных породах [75].

Роль метаболической регуляции дополнительно раскрывается через анализ FKBP5 — негативного регулятора глюкокортикоидного ответа. Du *et al.* (2025) показали, что FKBP5 высоко экспрессируется в инсулинчувствительных тканях, включая грудную мышцу, с пиком на 19-й день эмбрионального развития. Эксперименты с инсулином, голоданием и энергетическим ограничением демонстрируют его чувствительность к метаболическим стимулам: инсулин вызывает резкий рост экспрессии FKBP5 у бройлеров, тогда как голодание и ограничение энергии снижают его уровень [76]. Это указывает на участие FKBP5 в поддержании метаболического гомеостаза, что может быть связано с эффективностью роста и качеством мяса у промышленных линий.

Таким образом, экспрессия генов, связанных с ростом в грудной мышце кур, определяется сложным взаимодействием анаболических, метаболических и регуляторных путей, включая факторы роста, микроРНК и стрессовые ответы. Сравнительные исследования подчеркивают, что селекция на быстрый рост у бройлеров усиливает гликолитический метаболизм и гипертрофию волокон, но приводит к компромиссам в виде миопатий и изменения качества мяса. Понимание этих молекулярных механизмов

открывает перспективы для целенаправленного улучшения мясной продуктивности, балансирующего рост, здоровье и вкусовые качества.

Мышцы ног

В отличие от грудной мышцы, мышцы ног, такие как икроножная и четырехглавая, демонстрируют отчетливую транскриптомную сигнатуру. Мышцы ног, как правило, содержат более высокую долю окислительных волокон, что способствует метаболическому профилю, благоприятствующему выносливости и устойчивому сокращению [77]. Многочисленные исследования экспрессии генов продемонстрировали, что молекулярные механизмы, лежащие в основе развития и функционирования мышц ног у кур, тесно связаны с адаптацией к длительным нагрузкам и метаболической устойчивостью, что имеет важное значение для мясной продуктивности и качества мяса. Эти данные основаны на анализе транскриптомных профилей, выполненных в различных исследованиях, которые выявляют как общие закономерности, так и специфические особенности в зависимости от породы кур и стадий их развития.

Так, исследование Xue *et al.* (2017) сосредоточено на ранних стадиях роста кур и выявило 978 дифференциально экспрессируемых генов в мышцах ног на трех этапах развития. Эти гены, включая такие ключевые регуляторы, как MYOD1, FGF2, IGFBP5 и MYH10, участвуют в процессах роста клеток, развития мышц и клеточной активности, включая миграцию и пролиферацию. Анализ путей KEGG показал значительное обогащение в пяти сигнальных каскадах, связанных с ростом и развитием, таких как взаимодействие с внеклеточным матриксом, фокальная адгезия, плотные контакты, инсулиновая сигнализация и регуляция актинового цитоскелета. Эти пути подчеркивают важность структурных и метаболических адаптаций мышц ног, что согласуется с их окислительным фенотипом [78]. В свою очередь, Yin *et al.* (2021), изучая породу Haiyang yellow на четырех стадиях развития, выявили значительно большее число DEGs — 6150, среди которых такие гены, как MSTN, MYOD1, IGF1 и MYF5, играют центральную роль в регуляции роста и дифференциации мышц [79].

Примечательно, что обогащение путей ECM-рецепторного взаимодействия, фокальной адгезии, плотных контактов и инсулиновой сигнализации перекликается с выводами Xue *et al.* (2017), что указывает на консервативность этих механизмов независимо от породы и количества выявленных генов. Дополняя эти данные, Wu *et al.* (2018) сравнили экспрессию генов в мышцах ног кур породы Jinghai yellow с разной скоростью роста и выявили 87 генов. Среди них гены, участвующие в развитии скелетной системы и эмбриональных процессах, а также обогащение в инсулиновом и адипоцитокиновом сигнальных

путях, подчеркивают метаболическую основу различий в росте [80]. Хотя число генов в этом исследовании существенно меньше, чем в работах Xue *et al.* (2017) и Yin *et al.* (2021), акцент на инсулиновую сигнализацию согласуется с общими выводами о роли метаболических каскадов в поддержании окислительного профиля мышц ног. Сходные результаты получены и в исследовании He *et al.* (2019), где у кур породы Bian с разной массой тела были идентифицированы 108 генов. Здесь внимание уделено генам, связанным с сердечной и скелетной мускулатурой, а также плотным контактам, что дополняет картину структурных адаптаций, выявленных в других работах [81]. Обогащение в таких путях, как адренергическая сигнализация и сокращение мышц, указывает на дополнительные функциональные аспекты, связанные с устойчивостью к нагрузкам.

Сравнивая эти исследования, можно отметить, что, несмотря на различия в количестве генов и специфике пород, ключевые молекулярные пути (инсулиновая сигнализация, взаимодействие с ECM, фокальная адгезия и плотные контакты) остаются общими и отражают универсальные механизмы формирования метаболического и структурного профиля мышц ног. Таким образом, транскриптомные профили мышц ног у кур демонстрируют активацию генов, поддерживающих окислительный метаболизм и выносливость, что резко контрастирует с гликолитическим фенотипом грудной мышцы.

Гипоталамус

Гипоталамус, критический регуляторный центр в мозге, демонстрирует заметно отличающийся профиль экспрессии генов по сравнению с периферическими мышечными тканями. Хотя гипоталамус напрямую не способствует росту мышечной массы, он управляет ростом и массой тела через нейроэндокринные сигналы. Он регулирует аппетит, энергетический гомеостаз и секрецию гормонов, связанных с ростом, путем модуляции нейропептидов, таких как нейропептид Y (NPY), агути-родственный пептид (AgRP) и проопиомеланокортин (POMC) [82]. Эти процессы имеют ключевое значение для мясной продуктивности кур, поскольку гипоталамус интегрирует генетические и внешние факторы, влияющие на метаболизм и рост.

Многолетние исследования показывают, что экспрессия генов в гипоталамусе варьирует в зависимости от породы, возраста, питательных условий и стрессовых факторов, что позволяет глубже понять физиологические механизмы, лежащие в основе различий в продуктивности. Так, Yuan *et al.* (2009) выявили, что у бройлеров по сравнению с несушками значительно выше экспрессия мПНК и белка глюкокортикоидного рецептора (GR) в гипоталамусе, что связано с усиленной отрицательной обратной связью, регулирующей уровень кортикотропин-рилизинг-гормона (CRH).

Это сопровождается более низким уровнем мРНК CRH, но повышенным накоплением пептида CRH, что указывает на различия в регуляции оси «гипоталамус — гипофиз — надпочечники (HPA)» между породами. Кроме того, у бройлеров отмечается повышенная экспрессия гена FTO, ассоциированного с ожирением, подчеркивая роль гипоталамических генов в формировании энергетического баланса и массы тела [83]. Эти данные свидетельствуют о том, что генетическая селекция бройлеров усиливает экспрессию генов, связанных с энергетическим гомеостазом, а не орексигенными нейропептидами, такими как NPY или AgRP, которые не показали значимых различий между породами.

Сходные выводы дополняются исследованиями Piórkowska *et al.* (2020), которые выявили 43 дифференциально экспрессируемых гена (DEG) в гипоталамусе цыплят разного возраста, включая гены, регулирующие пищевое поведение (OXT, NPY, PMCH, BSX). У кур с низким темпом роста наблюдалась повышенная экспрессия генов, связанных с развитием органов, регуляцией гормонов и аппетитом, что указывает на адаптивные молекулярные механизмы, компенсирующие замедленный рост. В то же время у более старших кур с низким темпом роста активация генов воспалительного ответа и иммунных процессов подчеркивает сложность гипоталамической регуляции, которая выходит за рамки простого контроля массы тела [84]. Эти результаты согласуются с данными Yuan *et al.* (2009), демонстрируя, что гипоталамус играет многогранную роль в адаптации метаболизма к генетическим и физиологическим условиям.

Внешние факторы, такие как тепловой стресс, существенно влияют на экспрессию генов в гипоталамусе. Sun *et al.* (2015) показали, что при тепловом стрессе у кур происходят повышение экспрессии генов PTGS2, FIGF, ACTC1, MYH11 и BMP3 и понижение HMOX1 и PDGFB. Эти изменения связаны с ухудшением качества мяса, роста и скелетного развития, что указывает на ингибирующее влияние стресса на мышечную ткань через гипоталамические сигналы [85]. Tu *et al.* (2016) дополняют эти данные, отмечая, что острый тепловой стресс вызывает повышение экспрессии генов GNRH1, HSPB1, NPY и HSP25, а также понижение TRH2, влияя на репродуктивные функции и стрессовые реакции [86]. Сравнение этих исследований показывает, что тепловой стресс оказывает как краткосрочное, так и долгосрочное воздействие на продуктивность, изменяя экспрессию генов, связанных с метаболизмом и гормональной регуляцией.

Питательный стресс, такой как голодание, модулирует гипоталамическую активность. Fang *et al.* (2014) установили, что 48-часовое голодание усиливает экспрессию орексигенных нейропептидов NPY и AgRP, одновременно снижая экспрессию анорексигенного POMC, что сопровождается

изменениями в генах метаболизма липидов и глюкозы [87]. Это подчеркивает адаптивную роль гипоталамуса в условиях ограниченного питания, что особенно важно для интенсивного выращивания кур. Интересно, что инъекции ингибиторов и активаторов метаболических путей подтвердили влияние этих генов на аппетит, что связывает молекулярные изменения с поведенческими реакциями.

Badakhshan & Roudbari (2024) добавляют еще один аспект, показывая, что у кур в состоянии насиживания снижается экспрессия генов пролактинового пути (PRL, PRLR, AGRP, GHRL), тогда как гены серотонинергического (HTR4, TPH1, TPH2) и мелатонергического (MTNR1) путей активируются [88]. Эти изменения косвенно влияют на метаболизм и рост, демонстрируя, как репродуктивное поведение может модулировать продуктивность через гипоталамус.

Таким образом, гипоталамус выступает центральным узлом в регуляции роста и мясной продуктивности кур, интегрируя генетические различия и внешние воздействия через сложную сеть нейропептидов, гормонов и метаболических путей.

Выводы/Conclusions

Настоящий обзор обобщает и анализирует современные научные данные о молекулярно-генетических и эпигенетических механизмах, лежащих в основе мясной продуктивности у кур, демонстрируя их сложное взаимодействие в регуляции роста и развития мышечной ткани. Ключевые гены, такие как GHR, IGF-1, GNPDA2, MSTN и LDB2, играют центральную роль в этих процессах: GHR и IGF-1 стимулируют анаболические пути и рост мышц, GNPDA2 поддерживает энергетический гомеостаз, MSTN выступает отрицательным регулятором мышечной массы, а LDB2 модулирует развитие скелетных мышц. Эпигенетические модификации, включая метилирование ДНК и активность микроРНК, существенно влияют на экспрессию этих генов, особенно под воздействием питания и стресса, что подтверждается различиями в профилях экспрессии между промышленными бройлерами и местными породами.

Промышленные бройлеры демонстрируют повышенную экспрессию генов роста, но ценой риска мышечных миопатий, тогда как местные породы адаптированы к стрессу и устойчивости. Тканеспецифичность экспрессии (например, в грудной мышце, мышцах ног и гипоталамусе) подчеркивает необходимость учета функциональных особенностей тканей при селекции. Эти выводы обосновывают перспективы применения мультиомных подходов и нутри-эпигенетики для создания устойчивых линий кур с оптимизированной продуктивностью и здоровьем, что отвечает вызовам современного птицеводства.

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

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ НИОКТР 124020200114-7).

FUNDING

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. Research and Development Programme 124020200114-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bist R.B. *et al.* Sustainable poultry farming practices: a critical review of current strategies and future prospects. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104295. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104295>
2. Yin Zh. *et al.* Cecal Microbial Succession and Its Apparent Association with Nutrient Metabolism in Broiler Chickens. *mSphere*. 2023; 8(3): e00614–e00622. <https://doi.org/10.1128/msphere.00614-22>
3. Вязьнен Г.Н. и др. Биотехнические методы повышения продуктивности и биохимические показатели крови цыплят-бройлеров кросса Ross 508. *Аграрная наука*. 2022; 356(2): 47–53. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-356-2-47-53>
4. Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Переваримость питательных веществ корма и состояние обмена веществ у утят при применении «Иммунофлора». *Аграрная наука*. 2025; (2): 67–72. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-67-72>
5. Неверова О.П. и др. Влияние биотехнологической добавки на весовой рост цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2023; (11): 70–75. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-70-75>
6. Фёдорова З.Л., Вахрамеев А.Б., Макарова А.В. Перспектива использования пород кур комбинированного типа продуктивности в органическом птицеводстве. *Аграрная наука*. 2022; (12): 51–56. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-365-12-51-56>
7. 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(1): 1459–1475. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1459-1475>
8. Багно О.А., Прохоров О.Н., Федотов С.С., Рассолов С.Н., Шмидт А.А. Эффективность использования экструдированной пшеницы в кормлении цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2023; (11): 76–81. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-76-81>
9. Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B. Atherogenicity index, “good” lipoproteins and the ratio of total cholesterol and protein of broiler chickens in the health system. *Journal of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary and Zootechnics*. 2024; 4(9): 28–35. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_5](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_5)
10. David S.-A., Mersch M., Foissac S., Collin A., Pitel F., Coustham V. Genome-Wide Epigenetic Studies in Chicken: A Review. *Epigenomes*. 2017; 1(3): 20. <https://doi.org/10.3390/epigenomes1030020>
11. Мельников Н.П. и др. Происхождение, генетика и особенности эволюции генома сельскохозяйственных кур. *Научное обозрение. Биологические науки*. 2024; (1): 71–78. <https://doi.org/10.17513/srbs.1357>
12. Хвостик В.П., Бондаренко Ю.В. Интенсивность роста мяско-яичных курей різного генетичного походження. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Тваринництво*. 2021; 3(46): 91–94 (на укр. яз.) <https://doi.org/10.32845/bsnau.lvst.2021.3.12>
13. Ротова А.Ю., Багно О.А. Изучение экспрессии генов при оценке влияния различных факторов в птицеводстве. *Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы: материалы XI Национальной научно-практической конференции с международным участием*. Кемерово: Кузбасский государственный аграрный университет им. В.Н. Полецов. 2023; 144–147. <https://elibrary.ru/pnhura>
14. Иылдырым Е.А. и др. Влияние различных форм лизина и метионина в рационе бройлеров на профиль транскрипции ключевых генов. *Аграрная наука*. 2025; 391(02): 87–94. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-87-94>
15. Титов В.Ю. и др. Генетические маркеры мясной продуктивности домашних птиц. *Молекулярно-генетические технологии для анализа экспрессии генов продуктивности и устойчивости к заболеваниям животных: материалы 2-й Международной научно-практической конференции*. М.: Сельскохозяйственные технологии. 2020; 136–150. <https://elibrary.ru/kbcbhm>

REFERENCES

1. Bist R.B. *et al.* Sustainable poultry farming practices: a critical review of current strategies and future prospects. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104295. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104295>
2. Yin Zh. *et al.* Cecal Microbial Succession and Its Apparent Association with Nutrient Metabolism in Broiler Chickens. *mSphere*. 2023; 8(3): e00614–e00622. <https://doi.org/10.1128/msphere.00614-22>
3. Vyayzenen G.N. *et al.* Biotechnical methods for increasing productivity and blood biochemical parameters of broiler chickens of the Ross 508 cross. *Agrarian Science*. 2022; 356(2): 47–53 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-356-2-47-53>
4. Topuria L.Yu., Topuria G.M. Digestibility of feed nutrients and metabolic status in ducklings using “Immunoflor”. *Agrarian science*. 2025; (2): 67–72 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-67-72>
5. Neverova O.P. *et al.* Influence of a biotechnological additive on the weight growth of broiler chickens. *Agrarian science*. 2023; (11): 70–75 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-70-75>
6. Fedorova Z.L., Vakhrameev A.B., Makarova A.V. The prospect of using chicken breeds of the combined type of productivity in organic poultry farming. *Agrarian science*. 2022; (12): 51–56 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-365-12-51-56>
7. Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B., Mamylyna N.V. Atherogenicity index, lipoprotein ratio, total cholesterol and protein of broiler chickens as a factor in health-saving technologies. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24(1): 1459–1475 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1459-1475>
8. Bagno O.A., Prokhorov O.N., Fedotov S.S., Rassolov S.N., Schmidt A.A. Efficiency of the use of extruded fir flour in feeding broiler chickens. *Agrarian science*. 2023; (11): 76–81 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-76-81>
9. Kolesnik E.A., Derkho M.A., Rebezov M.B. Atherogenicity index, “good” lipoproteins and the ratio of total cholesterol and protein of broiler chickens in the health system. *Journal of Osh State University. Agriculture: Agronomy, Veterinary and Zootechnics*. 2024; 4(9): 28–35. [https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4\(9\)_5](https://doi.org/10.52754/16948696_2024_4(9)_5)
10. David S.-A., Mersch M., Foissac S., Collin A., Pitel F., Coustham V. Genome-Wide Epigenetic Studies in Chicken: A Review. *Epigenomes*. 2017; 1(3): 20. <https://doi.org/10.3390/epigenomes1030020>
11. Melnikov N.P. *et al.* Origin, genetics and evolutionary features of the genome of farm chickens. *Scientific review. Biological sciences*. 2024; (1): 71–78 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/srbs.1357>
12. Khvostyk V.P., Bondarenko Yu.V. Growth intensity of meat-laying chickens of different genetic origin. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Livestock*. 2021; 3(46): 91–94 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32845/bsnau.lvst.2021.3.12>
13. Rotova A.Yu., Bagno O.A. Study of gene expression in assessing the influence of various factors in poultry farming. *Current scientific and technical means and agricultural problems: Proceedings of the XI National scientific and practical conference with international participation*. Kemerovo: Kuzbass State Agrarian University named after V.N. Poletskov. 2023; 144–147 (in Russian). <https://elibrary.ru/pnhura>
14. Yildirim E.A. *et al.* The effect of various forms of lysine and methionine in the broiler diet on the transcription profile of key genes. *Agrarian science*. 2025; 391(02): 87–94 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-87-94>
15. Titov V.Yu. *et al.* Genetic markers of meat productivity of poultry. *Molecular genetic technologies for the analysis of gene expression of productivity and resistance to animal diseases: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Agricultural technologies. 2020; 136–150 (in Russian). <https://elibrary.ru/kbcbhm>

16. Йылдырым Е.А. и др. Экспрессия генов у сельскохозяйственной птицы под влиянием Т-2 токсина и применения биопрепаратов. *Acta biomedica scientifica*. 2022; 7(3): 180–189. <https://doi.org/10.29413/ABS.2022-7.3.19>
17. Kim J.W. The Endocrine Regulation of Chicken Growth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2010; 23(12): 1668–1676. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.10329>
18. Bhattacharya T.K., Chatterjee R.N. Polymorphism of the myostatin gene and its association with growth traits in chicken. *Poultry Science*. 2013; 92(4): 910–915. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02736>
19. Ouyang H. et al. Identification, expression and variation of the *GNPDA2* gene, and its association with body weight and fatness traits in chicken. *PeerJ*. 2016; 4: e2129. <https://doi.org/10.7717/peerj.2129>
20. Wei C. et al. Molecular characterization and a duplicated 31-bp indel within the *LDB2* gene and its associations with production performance in chickens. *Gene*. 2020; 761: 145046. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2020.145046>
21. Hull K.L., Fraser R.A., Marsh J.A., Harvey S. Growth hormone receptor gene expression in sex-linked dwarf Leghorn chickens: evidence against a gene deletion. *Journal of Endocrinology*. 1993; 137(1): 91–98. <https://doi.org/10.1677/joe.0.1370091>
22. Khaerunnisa I., Jakaria J., Arief I.I., Budiman C., Sumantri C. The Associations of GH and GHR Genes with Carcass Components in Indonesian Kampung and Broiler Chicken Cross. *Media Peternakan*. 2017; 40(2): 78–87. <https://doi.org/10.5398/medpet.2017.40.2.78>
23. Xu H.D. et al. Roles of chicken growth hormone receptor antisense transcript in chicken muscle development and myoblast differentiation. *Poultry Science*. 2019; 98(12): 6980–6988. <https://doi.org/10.3382/ps/pez416>
24. Yenice E., Çenesiz A.A., Yavaş İ., Toprak N.N., Çiftci İ., Ceylan N. An investigation of the assumed efficacy of methionine hydroxy analogue compared to DL-methionine by measuring growth performance, carcass traits, and GHR and IGF-I expression in broilers. *Italian Journal of Animal Science*. 2023; 22(1): 1083–1094. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2271056>
25. Chen L. et al. Integrative Analyses of mRNA Expression Profile Reveal SOCS2 and CISH Play Important Roles in GHR Mutation-Induced Excessive Abdominal Fat Deposition in the Sex-Linked Dwarf Chicken. *Front Genet*. 2021; 11: 610605. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.610605>
PMID: 33519913
PMCID: PMC7841439
26. Yang C. et al. Effects of Growth-Related Genes on Body Measurement Traits in Wenshang Barred Chickens. *The Journal of Poultry Science*. 2022; 59(4): 323–327. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0210138>
27. Kazemi H., Rezaei M., Hafezian H., Mianji G.R., Najafi M. Genetic Analysis of SNPs in *GH*, *GHR*, *IGF-I* and *IGFBP-II* Genes and their Association with Some Productive and Reproductive Traits in Native Breeder Hens. *Gene Technology*. 2018; 7(1): 145. <https://doi.org/10.4172/2329-6682.1000145>
28. Fujita S., Honda K., Yamaguchi M., Fukuzo S., Saneyasu T., Kamisoyama H. Role of Insulin-like Growth Factor-1 in the Central Regulation of Feeding Behavior in Chicks. *The Journal of Poultry Science*. 2019; 56(4): 270–276. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0180127>
29. Chen R., Zhuang S., Chen Y.P., Cheng Y.F., Wen C., Zhou Y.M. Betaine improves the growth performance and muscle growth of partridge shank broiler chickens by altering myogenic gene expression and insulin-like growth factor-1 signaling pathway. *Poultry Science*. 2018; 97(12): 4297–4305. <https://doi.org/10.3382/ps/pey303>
30. Wen C., Jiang X., Ding L., Wang T., Zhou Y. Effects of dietary methionine on breast muscle growth, myogenic gene expression and IGF-I signaling in fast- and slow-growing broilers. *Scientific Reports*. 2017; 7: 1924. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02142-z>
31. Salehizadeh M., Modarressi M.H., Mousavi S.N., Ebrahimi M.T. Effects of probiotic lactic acid bacteria on growth performance, carcass characteristics, hematological indices, humoral immunity, and IGF-I gene expression in broiler chicken. *Tropical Animal Health and Production*. 2019; 51(8): 2279–2286. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01935-w>
32. Sinpru P. et al. Association of growth hormone and insulin-like growth factor I genotype with body weight, dominance of body weight, and mRNA expression in Korat slow-growing chickens. *Animal Bioscience*. 2021; 34(12): 1886–1894. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0729>
16. Yildirim E.A. et al. Gene expression in farm poultry under the influence of T-2 toxin and the use of biological preparations. *Acta biomedica scientifica*. 2022; 7(3): 180–189 (in Russian). <https://doi.org/10.29413/ABS.2022-7.3.19>
17. Kim J.W. The Endocrine Regulation of Chicken Growth. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2010; 23(12): 1668–1676. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.10329>
18. Bhattacharya T.K., Chatterjee R.N. Polymorphism of the myostatin gene and its association with growth traits in chicken. *Poultry Science*. 2013; 92(4): 910–915. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02736>
19. Ouyang H. et al. Identification, expression and variation of the *GNPDA2* gene, and its association with body weight and fatness traits in chicken. *PeerJ*. 2016; 4: e2129. <https://doi.org/10.7717/peerj.2129>
20. Wei C. et al. Molecular characterization and a duplicated 31-bp indel within the *LDB2* gene and its associations with production performance in chickens. *Gene*. 2020; 761: 145046. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2020.145046>
21. Hull K.L., Fraser R.A., Marsh J.A., Harvey S. Growth hormone receptor gene expression in sex-linked dwarf Leghorn chickens: evidence against a gene deletion. *Journal of Endocrinology*. 1993; 137(1): 91–98. <https://doi.org/10.1677/joe.0.1370091>
22. Khaerunnisa I., Jakaria J., Arief I.I., Budiman C., Sumantri C. The Associations of GH and GHR Genes with Carcass Components in Indonesian Kampung and Broiler Chicken Cross. *Media Peternakan*. 2017; 40(2): 78–87. <https://doi.org/10.5398/medpet.2017.40.2.78>
23. Xu H.D. et al. Roles of chicken growth hormone receptor antisense transcript in chicken muscle development and myoblast differentiation. *Poultry Science*. 2019; 98(12): 6980–6988. <https://doi.org/10.3382/ps/pez416>
24. Yenice E., Çenesiz A.A., Yavaş İ., Toprak N.N., Çiftci İ., Ceylan N. An investigation of the assumed efficacy of methionine hydroxy analogue compared to DL-methionine by measuring growth performance, carcass traits, and GHR and IGF-I expression in broilers. *Italian Journal of Animal Science*. 2023; 22(1): 1083–1094. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2271056>
25. Chen L. et al. Integrative Analyses of mRNA Expression Profile Reveal SOCS2 and CISH Play Important Roles in GHR Mutation-Induced Excessive Abdominal Fat Deposition in the Sex-Linked Dwarf Chicken. *Front Genet*. 2021; 11: 610605. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.610605>
PMID: 33519913
PMCID: PMC7841439
26. Yang C. et al. Effects of Growth-Related Genes on Body Measurement Traits in Wenshang Barred Chickens. *The Journal of Poultry Science*. 2022; 59(4): 323–327. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0210138>
27. Kazemi H., Rezaei M., Hafezian H., Mianji G.R., Najafi M. Genetic Analysis of SNPs in *GH*, *GHR*, *IGF-I* and *IGFBP-II* Genes and their Association with Some Productive and Reproductive Traits in Native Breeder Hens. *Gene Technology*. 2018; 7(1): 145. <https://doi.org/10.4172/2329-6682.1000145>
28. Fujita S., Honda K., Yamaguchi M., Fukuzo S., Saneyasu T., Kamisoyama H. Role of Insulin-like Growth Factor-1 in the Central Regulation of Feeding Behavior in Chicks. *The Journal of Poultry Science*. 2019; 56(4): 270–276. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0180127>
29. Chen R., Zhuang S., Chen Y.P., Cheng Y.F., Wen C., Zhou Y.M. Betaine improves the growth performance and muscle growth of partridge shank broiler chickens by altering myogenic gene expression and insulin-like growth factor-1 signaling pathway. *Poultry Science*. 2018; 97(12): 4297–4305. <https://doi.org/10.3382/ps/pey303>
30. Wen C., Jiang X., Ding L., Wang T., Zhou Y. Effects of dietary methionine on breast muscle growth, myogenic gene expression and IGF-I signaling in fast- and slow-growing broilers. *Scientific Reports*. 2017; 7: 1924. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02142-z>
31. Salehizadeh M., Modarressi M.H., Mousavi S.N., Ebrahimi M.T. Effects of probiotic lactic acid bacteria on growth performance, carcass characteristics, hematological indices, humoral immunity, and IGF-I gene expression in broiler chicken. *Tropical Animal Health and Production*. 2019; 51(8): 2279–2286. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-01935-w>
32. Sinpru P. et al. Association of growth hormone and insulin-like growth factor I genotype with body weight, dominance of body weight, and mRNA expression in Korat slow-growing chickens. *Animal Bioscience*. 2021; 34(12): 1886–1894. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0729>

33. Hosnedlova B. *et al.* Associations Between *IGF1*, *IGFBP2* and *TGFβ3* Genes Polymorphisms and Growth Performance of Broiler Chicken Lines. *Animals*. 2020; 10(5): 800. <https://doi.org/10.3390/ani10050800>
34. Guo Y. *et al.* Evolutionary analysis and functional characterization reveal the role of the insulin-like growth factor system in a diversified selection of chickens (*Gallus gallus*). *Poultry Science*. 2023; 102(3): 102411. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102411>
35. El-Attrouny M.M., Iraqi M.M., Sabike I.I., Abdelatty A.M., Moustafa M.M., Badr O.A. Comparative evaluation of growth performance, carcass characteristics and timed series gene expression profile of *GH* and *IGF-1* in two Egyptian indigenous chicken breeds versus Rhode Island Red. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2021; 138(4): 463–473. <https://doi.org/10.1111/jbg.12517>
36. Nurcahya H., Sinaga E., Darwati S., Khaerunissa I. Relationship between of Insuline Like growth Factor-2 Gene and Growth Traits in Crosses of Indonesian Local Chicken. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1665: 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1665/1/012015>
37. Yu M. *et al.* Insulin-like growth factor-1 (IGF-1) promotes myoblast proliferation and skeletal muscle growth of embryonic chickens via the PI3K/Akt signalling pathway. *Cell Biology International*. 2015; 39(8): 910–922. <https://doi.org/10.1002/cbin.10466>
38. Saneyasu T. *et al.* The IGF-1/Akt/S6 Signaling Pathway is Age-Dependently Downregulated in the Chicken Breast Muscle. *The Journal of Poultry Science*. 2016; 53(3): 213–219. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0150171>
39. Abdalla B.A., Chen J., Nie Q., Zhang X. Genomic Insights Into the Multiple Factors Controlling Abdominal Fat Deposition in a Chicken Model. *Frontiers in Genetics*. 2018; 9: 262. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00262>
40. McPherron A.C., Lee S.-J. Double muscling in cattle due to mutations in the myostatin gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1997; 94(23): 12457–12461. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.23.12457>
41. Kambadur R., Sharma M., Smith T.P.L., Bass J.J. Mutations in *myostatin* (*GDF8*) in Double-Muscled Belgian Blue and Piedmontese Cattle. *Genome Research*. 1997; 7(9): 910–915. <https://doi.org/10.1101/gr.7.9.910>
42. Kim D.-H. *et al.* Differential Expression of MSTN Isoforms in Muscle between Broiler and Layer Chickens. *Animals*. 2022; 12(5): 539. <https://doi.org/10.3390/ani12050539>
43. Lee J., Kim D.-H., Lee K. Myostatin gene role in regulating traits of poultry species for potential industrial applications. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2024; 15: 82. <https://doi.org/10.1186/s40104-024-01040-5>
44. Xu K. *et al.* Transcriptomic Analysis of *MSTN* Knockout in the Early Differentiation of Chicken Fetal Myoblasts. *Genes*. 2022; 13(1): 58. <https://doi.org/10.3390/genes13010058>
45. Ren T., Xu M., Lin W., Luo W., Zhang X. Transcriptome sequencing reveals the potential mechanisms of dietary lutein regulation on chicken leg muscle development. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104265>
46. Yousefi K., Allymehr M., Talebi A., Tukmechi A. A comparative study on the expression of myogenic genes and their effects on performance and meat quality in broiler chicken strains. *Veterinary Research Forum*. 2024; 15(5): 243–250. <https://doi.org/10.30466/vrf.2024.2014542.4046>
47. Kumaravel V., Mohan B., Natarajan A., Murali N., Selvaraj P., Vasanthakumar P. Effect on growth performance, carcass traits, and myostatin gene expression in Aseel chicken fed varied levels of dietary protein in isocaloric energy diets. *Tropical Animal Health and Production*. 2023; 55(2): 82. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03505-7>
48. Malila Y. *et al.* Differential expression patterns of genes associated with metabolisms, muscle growth and repair in *Pectoralis major* muscles of fast- and medium-growing chickens. *PLoS ONE*. 2022; 17(10): e0275160. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275160>
49. Mukhopadhyay M. *et al.* Functional ablation of the mouse *Ldb1* gene results in severe patterning defects during gastrulation. *Development*. 2003; 130(3): 495–505. <https://doi.org/10.1242/dev.00225>
50. Yasuoka Y., Kobayashi M., Kurokawa D., Akasaka K., Saiga H., Taira M. Evolutionary origins of blastoporal expression and organizer activity of the vertebrate gastrula organizer gene *lhx1* and its ancient metazoan paralog *lhx3*. *Development*. 2009; 136(12): 2005–2014. <https://doi.org/10.1242/dev.028530>
33. Hosnedlova B. *et al.* Associations Between *IGF1*, *IGFBP2* and *TGFβ3* Genes Polymorphisms and Growth Performance of Broiler Chicken Lines. *Animals*. 2020; 10(5): 800. <https://doi.org/10.3390/ani10050800>
34. Guo Y. *et al.* Evolutionary analysis and functional characterization reveal the role of the insulin-like growth factor system in a diversified selection of chickens (*Gallus gallus*). *Poultry Science*. 2023; 102(3): 102411. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102411>
35. El-Attrouny M.M., Iraqi M.M., Sabike I.I., Abdelatty A.M., Moustafa M.M., Badr O.A. Comparative evaluation of growth performance, carcass characteristics and timed series gene expression profile of *GH* and *IGF-1* in two Egyptian indigenous chicken breeds versus Rhode Island Red. *Journal of Animal Breeding and Genetics*. 2021; 138(4): 463–473. <https://doi.org/10.1111/jbg.12517>
36. Nurcahya H., Sinaga E., Darwati S., Khaerunissa I. Relationship between of Insuline Like growth Factor-2 Gene and Growth Traits in Crosses of Indonesian Local Chicken. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1665: 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1665/1/012015>
37. Yu M. *et al.* Insulin-like growth factor-1 (IGF-1) promotes myoblast proliferation and skeletal muscle growth of embryonic chickens via the PI3K/Akt signalling pathway. *Cell Biology International*. 2015; 39(8): 910–922. <https://doi.org/10.1002/cbin.10466>
38. Saneyasu T. *et al.* The IGF-1/Akt/S6 Signaling Pathway is Age-Dependently Downregulated in the Chicken Breast Muscle. *The Journal of Poultry Science*. 2016; 53(3): 213–219. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0150171>
39. Abdalla B.A., Chen J., Nie Q., Zhang X. Genomic Insights Into the Multiple Factors Controlling Abdominal Fat Deposition in a Chicken Model. *Frontiers in Genetics*. 2018; 9: 262. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00262>
40. McPherron A.C., Lee S.-J. Double muscling in cattle due to mutations in the myostatin gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1997; 94(23): 12457–12461. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.23.12457>
41. Kambadur R., Sharma M., Smith T.P.L., Bass J.J. Mutations in *myostatin* (*GDF8*) in Double-Muscled Belgian Blue and Piedmontese Cattle. *Genome Research*. 1997; 7(9): 910–915. <https://doi.org/10.1101/gr.7.9.910>
42. Kim D.-H. *et al.* Differential Expression of MSTN Isoforms in Muscle between Broiler and Layer Chickens. *Animals*. 2022; 12(5): 539. <https://doi.org/10.3390/ani12050539>
43. Lee J., Kim D.-H., Lee K. Myostatin gene role in regulating traits of poultry species for potential industrial applications. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2024; 15: 82. <https://doi.org/10.1186/s40104-024-01040-5>
44. Xu K. *et al.* Transcriptomic Analysis of *MSTN* Knockout in the Early Differentiation of Chicken Fetal Myoblasts. *Genes*. 2022; 13(1): 58. <https://doi.org/10.3390/genes13010058>
45. Ren T., Xu M., Lin W., Luo W., Zhang X. Transcriptome sequencing reveals the potential mechanisms of dietary lutein regulation on chicken leg muscle development. *Poultry Science*. 2024; 103(12): 104265. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104265>
46. Yousefi K., Allymehr M., Talebi A., Tukmechi A. A comparative study on the expression of myogenic genes and their effects on performance and meat quality in broiler chicken strains. *Veterinary Research Forum*. 2024; 15(5): 243–250. <https://doi.org/10.30466/vrf.2024.2014542.4046>
47. Kumaravel V., Mohan B., Natarajan A., Murali N., Selvaraj P., Vasanthakumar P. Effect on growth performance, carcass traits, and myostatin gene expression in Aseel chicken fed varied levels of dietary protein in isocaloric energy diets. *Tropical Animal Health and Production*. 2023; 55(2): 82. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03505-7>
48. Malila Y. *et al.* Differential expression patterns of genes associated with metabolisms, muscle growth and repair in *Pectoralis major* muscles of fast- and medium-growing chickens. *PLoS ONE*. 2022; 17(10): e0275160. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275160>
49. Mukhopadhyay M. *et al.* Functional ablation of the mouse *Ldb1* gene results in severe patterning defects during gastrulation. *Development*. 2003; 130(3): 495–505. <https://doi.org/10.1242/dev.00225>
50. Yasuoka Y., Kobayashi M., Kurokawa D., Akasaka K., Saiga H., Taira M. Evolutionary origins of blastoporal expression and organizer activity of the vertebrate gastrula organizer gene *lhx1* and its ancient metazoan paralog *lhx3*. *Development*. 2009; 136(12): 2005–2014. <https://doi.org/10.1242/dev.028530>

51. Wei C. *et al.* Divergent Regulatory Roles of Transcriptional Variants of the Chicken *LDB3* Gene in Muscle Shaping. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024; 72(21): 12240–12250. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00520>
52. Guerrero-Bosagna C., Skinner M.K. Environmentally induced epigenetic transgenerational inheritance of phenotype and disease. *Molecular and Cellular Endocrinology*. 2012; 354(1–2): 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2011.10.004>
53. Dunislawski A., Slawinska A., Siwek M. Hepatic DNA Methylation in Response to Early Stimulation of Microbiota with *Lactobacillus* Synbiotics in Broiler Chickens. *Genes*. 2020; 11(5): 579. <https://doi.org/10.3390/genes11050579>
54. Sikorska M., Siwek M., Slawinska A., Dunislawski A. miRNA Profiling in the Chicken Liver under the Influence of Early Microbiota Stimulation with Probiotic, Prebiotic, and Synbiotic. *Genes*. 2021; 12(5): 685. <https://doi.org/10.3390/genes12050685>
55. Dunislawski A., Gryzinska M., Siwek M. Changes in the gene expression and methylation in chicken cecal tonsils after in ovo administration of bioactive substances. *Scientific Reports*. 2023; 13: 19840. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47080-1>
56. Ibrahim M., Bednarczyk M., Stadnicka K., Grochowska E. Inter- and Transgenerational Effects of In Ovo Stimulation with Bioactive Compounds on Cecal Tonsils and Cecal Mucosa Transcriptomes in a Chicken Model. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(3): 1174. <https://doi.org/10.3390/ijms26031174>
57. Alagawany M. *et al.* Betaine and related compounds: Chemistry, metabolism and role in mitigating heat stress in poultry. *Journal of Thermal Biology*. 2022; 104: 103168. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103168>
58. Yu B. *et al.* Identification of key differentially methylated genes in regulating muscle development and intramuscular fat deposition in chickens. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024; 264(2): 130737. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130737>
59. Florini J.R., Ewton D.Z., Coolican S.A. Growth Hormone and the Insulin-Like Growth Factor System in Myogenesis. *Endocrine Reviews*. 1996; 17(5): 481–517. <https://doi.org/10.1210/edrv-17-5-481>
60. Li R., Hu Y., Ni Y., Xia D., Grossmann R., Zhao R. Leptin stimulates hepatic activation of thyroid hormones and promotes early posthatch growth in the chicken. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2011; 160(2): 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2011.06.001>
61. Wu H., Xu T., Yang N., Zhang J., Xu S. Low-Se Diet Increased Mitochondrial ROS to Suppress Myoblasts Proliferation and Promote Apoptosis in Broilers via miR-365-3p/SeIT Signaling Axis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024; 72(1): 284–299. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04406>
62. Kong B.-W. *et al.* RNA sequencing for global gene expression associated with muscle growth in a single male modern broiler line compared to a foundational Barred Plymouth Rock chicken line. *BMC Genomics*. 2017; 18: 82. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3471-y>
63. Mohammadabadi M., Bordbar F., Jensen J., Du M., Guo W. Key Genes Regulating Skeletal Muscle Development and Growth in Farm Animals. *Animals*. 2021; 11(3): 835. <https://doi.org/10.3390/ani11030835>
64. Jawasreh K., Al Athamneh S., Al-Zghoul M.B., Al Amareen A., Al Sukhni I., Aad P. Evaluation of growth performance and muscle marker genes expression in four different broiler strains in Jordan. *Italian Journal of Animal Science*. 2019; 18(1): 766–776. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1573647>
65. Lassiter K., Kong B.C., Piekarski-Welsher A., Dridi S., Bottje W.G. Gene Expression Essential for Myostatin Signaling and Skeletal Muscle Development Is Associated With Divergent Feed Efficiency in Pedigree Male Broilers. *Frontiers in Physiology*. 2019; 10: 126. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00126>
66. Yalcin S., Ozkan S., Acar M.C., Meral O. The occurrence of deep pectoral myopathy in broilers and associated changes in breast meat quality. *British Poultry Science*. 2018; 59(1): 55–62. <https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1401214>
67. Izadnia H.R., Tahmoorespur M., Bakhtiarzadeh M.R., Nassiri M., Esmaeilkhani S. Gene expression profile analysis of residual feed intake for Isfahan native chickens using RNA-SEQ data. *Italian Journal of Animal Science*. 2019; 18(1): 246–260. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1507625>
68. Chen F. *et al.* Transcriptome Analysis of Differentially Expressed Genes Related to the Growth and Development of the Jinghai Yellow Chicken. *Genes*. 2019; 10(7): 539. <https://doi.org/10.3390/genes10070539>
51. Wei C. *et al.* Divergent Regulatory Roles of Transcriptional Variants of the Chicken *LDB3* Gene in Muscle Shaping. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024; 72(21): 12240–12250. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00520>
52. Guerrero-Bosagna C., Skinner M.K. Environmentally induced epigenetic transgenerational inheritance of phenotype and disease. *Molecular and Cellular Endocrinology*. 2012; 354(1–2): 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.mce.2011.10.004>
53. Dunislawski A., Slawinska A., Siwek M. Hepatic DNA Methylation in Response to Early Stimulation of Microbiota with *Lactobacillus* Synbiotics in Broiler Chickens. *Genes*. 2020; 11(5): 579. <https://doi.org/10.3390/genes11050579>
54. Sikorska M., Siwek M., Slawinska A., Dunislawski A. miRNA Profiling in the Chicken Liver under the Influence of Early Microbiota Stimulation with Probiotic, Prebiotic, and Synbiotic. *Genes*. 2021; 12(5): 685. <https://doi.org/10.3390/genes12050685>
55. Dunislawski A., Gryzinska M., Siwek M. Changes in the gene expression and methylation in chicken cecal tonsils after in ovo administration of bioactive substances. *Scientific Reports*. 2023; 13: 19840. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47080-1>
56. Ibrahim M., Bednarczyk M., Stadnicka K., Grochowska E. Inter- and Transgenerational Effects of In Ovo Stimulation with Bioactive Compounds on Cecal Tonsils and Cecal Mucosa Transcriptomes in a Chicken Model. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(3): 1174. <https://doi.org/10.3390/ijms26031174>
57. Alagawany M. *et al.* Betaine and related compounds: Chemistry, metabolism and role in mitigating heat stress in poultry. *Journal of Thermal Biology*. 2022; 104: 103168. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103168>
58. Yu B. *et al.* Identification of key differentially methylated genes in regulating muscle development and intramuscular fat deposition in chickens. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024; 264(2): 130737. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130737>
59. Florini J.R., Ewton D.Z., Coolican S.A. Growth Hormone and the Insulin-Like Growth Factor System in Myogenesis. *Endocrine Reviews*. 1996; 17(5): 481–517. <https://doi.org/10.1210/edrv-17-5-481>
60. Li R., Hu Y., Ni Y., Xia D., Grossmann R., Zhao R. Leptin stimulates hepatic activation of thyroid hormones and promotes early posthatch growth in the chicken. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2011; 160(2): 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2011.06.001>
61. Wu H., Xu T., Yang N., Zhang J., Xu S. Low-Se Diet Increased Mitochondrial ROS to Suppress Myoblasts Proliferation and Promote Apoptosis in Broilers via miR-365-3p/SeIT Signaling Axis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024; 72(1): 284–299. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04406>
62. Kong B.-W. *et al.* RNA sequencing for global gene expression associated with muscle growth in a single male modern broiler line compared to a foundational Barred Plymouth Rock chicken line. *BMC Genomics*. 2017; 18: 82. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3471-y>
63. Mohammadabadi M., Bordbar F., Jensen J., Du M., Guo W. Key Genes Regulating Skeletal Muscle Development and Growth in Farm Animals. *Animals*. 2021; 11(3): 835. <https://doi.org/10.3390/ani11030835>
64. Jawasreh K., Al Athamneh S., Al-Zghoul M.B., Al Amareen A., Al Sukhni I., Aad P. Evaluation of growth performance and muscle marker genes expression in four different broiler strains in Jordan. *Italian Journal of Animal Science*. 2019; 18(1): 766–776. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1573647>
65. Lassiter K., Kong B.C., Piekarski-Welsher A., Dridi S., Bottje W.G. Gene Expression Essential for Myostatin Signaling and Skeletal Muscle Development Is Associated With Divergent Feed Efficiency in Pedigree Male Broilers. *Frontiers in Physiology*. 2019; 10: 126. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00126>
66. Yalcin S., Ozkan S., Acar M.C., Meral O. The occurrence of deep pectoral myopathy in broilers and associated changes in breast meat quality. *British Poultry Science*. 2018; 59(1): 55–62. <https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1401214>
67. Izadnia H.R., Tahmoorespur M., Bakhtiarzadeh M.R., Nassiri M., Esmaeilkhani S. Gene expression profile analysis of residual feed intake for Isfahan native chickens using RNA-SEQ data. *Italian Journal of Animal Science*. 2019; 18(1): 246–260. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1507625>
68. Chen F. *et al.* Transcriptome Analysis of Differentially Expressed Genes Related to the Growth and Development of the Jinghai Yellow Chicken. *Genes*. 2019; 10(7): 539. <https://doi.org/10.3390/genes10070539>

69. Li Z. *et al.* Profiles of expression pattern and tissue distribution of host defense peptides genes in different chicken (*Gallus gallus*) breeds related to body weight. *PLoS ONE*. 2020; 15(12): e0238675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238675>
70. Kocamis H., McFarland D.C., Killefer J. Temporal expression of growth factor genes during myogenesis of satellite cells derived from the biceps femoris and pectoralis major muscles of the chicken. *Journal of Cellular Physiology*. 2001; 186(1): 146–152. [https://doi.org/10.1002/1097-4652\(200101\)186:1<146::AID-JCP1014>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-4652(200101)186:1<146::AID-JCP1014>3.0.CO;2-Q)
71. Zhang Z. *et al.* Small RNA sequencing of pectoral muscle tissue reveals microRNA-mediated gene modulation in chicken muscle growth. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2020; 104(3): 867–875. <https://doi.org/10.1111/jpn.13312>
72. Zhang Y. *et al.* Transcriptome analysis of the pectoral muscles of local chickens and commercial broilers using Ribo-Zero ribonucleic acid sequencing. *PLoS ONE*. 2017; 12(9): e0184115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184115>
73. Bordini M., Soglia F., Davoli R., Zappaterra M., Petracci M., Meluzzi A. Molecular Pathways and Key Genes Associated With Breast Width and Protein Content in White Striping and Wooden Breast Chicken Pectoral Muscle. *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 936768. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.936768>
74. Mutryn M.F., Brannick E.M., Fu W., Lee W.R., Abasht B. Characterization of a novel chicken muscle disorder through differential gene expression and pathway analysis using RNA-sequencing. *BMC Genomics*. 2015; 16: 399. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1623-0>
75. Hu Y., Su J., Cheng L., Lan D., Li D. Pectoral muscle transcriptome analyses reveal high-altitude adaptations in Tibetan chickens. *Animal Biology*. 2020; 70(4): 385–400. <https://doi.org/10.1163/15707563-bja10026>
76. Du P. *et al.* *FKBP5* as a key regulator of metabolic processes in birds: Insights from chicken pectoral muscle. *Poultry Science*. 2025; 104(1): 104657. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104657>
77. Torrella J.R., Fouces V., Fouces J., Viscor G. Capillarity and Fibre Types in Locomotory Muscles of Wild Yellow-Legged Gulls (*Larus cachinnans*). *Physiological Zoology*. 1998; 71(4): 425–434. <https://doi.org/10.1086/515425>
78. Xue Q., Zhang G., Li T., Ling J., Zhang X., Wang J. Transcriptomic profile of leg muscle during early growth in chicken. *PLoS ONE*. 2017; 12(3): e0173824. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173824>
79. Yin X., Wu Y., Zhang S., Zhang T., Zhang G., Wang J. Transcriptomic profile of leg muscle during early growth and development in Haiyang yellow chicken. *Archives Animal Breeding*. 2021; 64(2): 405–416. <https://doi.org/10.5194/aab-64-405-2021>
80. Wu P. *et al.* Transcriptome profile analysis of leg muscle tissues between slow- and fast-growing chickens. *PLoS ONE*. 2018; 13(11): e0206131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206131>
81. He M. *et al.* Transcriptome analysis of leg muscles in fast and slow growth Bian chickens. *Animal Biotechnology*. 2020; 31(4): 295–305. <https://doi.org/10.1080/10495398.2019.1588129>
82. Millington G.W.M. The role of proopiomelanocortin (POMC) neurones in feeding behaviour. *Nutrition & Metabolism*. 2007; 4: 18. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-4-18>
83. Yuan L., Ni Y., Barth S., Wang Y., Grossmann R., Zhao R. Layer and broiler chicks exhibit similar hypothalamic expression of orexigenic neuropeptides but distinct expression of genes related to energy homeostasis and obesity. *Brain Research*. 2009; 1273: 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.03.052>
84. Piórkowska K. *et al.* Identification of candidate genes and regulatory factors related to growth rate through hypothalamus transcriptome analyses in broiler chickens. *BMC Genomics*. 2020; 21: 509. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06884-5>
85. Sun H. *et al.* Transcriptome responses to heat stress in hypothalamus of a meat-type chicken. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2015; 6: 6. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0003-6>
86. Tu W.-L. *et al.* Profiling of differential gene expression in the hypothalamus of broiler-type Taiwan country chickens in response to acute heat stress. *Theriogenology*. 2016; 85(3): 483–494.e8. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.09.028>
87. Fang X.-L. *et al.* Differential gene expression pattern in hypothalamus of chickens during fasting-induced metabolic reprogramming: Functions of glucose and lipid metabolism in the feed intake of chickens. *Poultry Science*. 2014; 93(11): 2841–2854. <https://doi.org/10.3382/ps.2014-04047>
69. Li Z. *et al.* Profiles of expression pattern and tissue distribution of host defense peptides genes in different chicken (*Gallus gallus*) breeds related to body weight. *PLoS ONE*. 2020; 15(12): e0238675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238675>
70. Kocamis H., McFarland D.C., Killefer J. Temporal expression of growth factor genes during myogenesis of satellite cells derived from the biceps femoris and pectoralis major muscles of the chicken. *Journal of Cellular Physiology*. 2001; 186(1): 146–152. [https://doi.org/10.1002/1097-4652\(200101\)186:1<146::AID-JCP1014>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-4652(200101)186:1<146::AID-JCP1014>3.0.CO;2-Q)
71. Zhang Z. *et al.* Small RNA sequencing of pectoral muscle tissue reveals microRNA-mediated gene modulation in chicken muscle growth. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2020; 104(3): 867–875. <https://doi.org/10.1111/jpn.13312>
72. Zhang Y. *et al.* Transcriptome analysis of the pectoral muscles of local chickens and commercial broilers using Ribo-Zero ribonucleic acid sequencing. *PLoS ONE*. 2017; 12(9): e0184115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184115>
73. Bordini M., Soglia F., Davoli R., Zappaterra M., Petracci M., Meluzzi A. Molecular Pathways and Key Genes Associated With Breast Width and Protein Content in White Striping and Wooden Breast Chicken Pectoral Muscle. *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 936768. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.936768>
74. Mutryn M.F., Brannick E.M., Fu W., Lee W.R., Abasht B. Characterization of a novel chicken muscle disorder through differential gene expression and pathway analysis using RNA-sequencing. *BMC Genomics*. 2015; 16: 399. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1623-0>
75. Hu Y., Su J., Cheng L., Lan D., Li D. Pectoral muscle transcriptome analyses reveal high-altitude adaptations in Tibetan chickens. *Animal Biology*. 2020; 70(4): 385–400. <https://doi.org/10.1163/15707563-bja10026>
76. Du P. *et al.* *FKBP5* as a key regulator of metabolic processes in birds: Insights from chicken pectoral muscle. *Poultry Science*. 2025; 104(1): 104657. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104657>
77. Torrella J.R., Fouces V., Fouces J., Viscor G. Capillarity and Fibre Types in Locomotory Muscles of Wild Yellow-Legged Gulls (*Larus cachinnans*). *Physiological Zoology*. 1998; 71(4): 425–434. <https://doi.org/10.1086/515425>
78. Xue Q., Zhang G., Li T., Ling J., Zhang X., Wang J. Transcriptomic profile of leg muscle during early growth in chicken. *PLoS ONE*. 2017; 12(3): e0173824. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173824>
79. Yin X., Wu Y., Zhang S., Zhang T., Zhang G., Wang J. Transcriptomic profile of leg muscle during early growth and development in Haiyang yellow chicken. *Archives Animal Breeding*. 2021; 64(2): 405–416. <https://doi.org/10.5194/aab-64-405-2021>
80. Wu P. *et al.* Transcriptome profile analysis of leg muscle tissues between slow- and fast-growing chickens. *PLoS ONE*. 2018; 13(11): e0206131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206131>
81. He M. *et al.* Transcriptome analysis of leg muscles in fast and slow growth Bian chickens. *Animal Biotechnology*. 2020; 31(4): 295–305. <https://doi.org/10.1080/10495398.2019.1588129>
82. Millington G.W.M. The role of proopiomelanocortin (POMC) neurones in feeding behaviour. *Nutrition & Metabolism*. 2007; 4: 18. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-4-18>
83. Yuan L., Ni Y., Barth S., Wang Y., Grossmann R., Zhao R. Layer and broiler chicks exhibit similar hypothalamic expression of orexigenic neuropeptides but distinct expression of genes related to energy homeostasis and obesity. *Brain Research*. 2009; 1273: 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.03.052>
84. Piórkowska K. *et al.* Identification of candidate genes and regulatory factors related to growth rate through hypothalamus transcriptome analyses in broiler chickens. *BMC Genomics*. 2020; 21: 509. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06884-5>
85. Sun H. *et al.* Transcriptome responses to heat stress in hypothalamus of a meat-type chicken. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2015; 6: 6. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0003-6>
86. Tu W.-L. *et al.* Profiling of differential gene expression in the hypothalamus of broiler-type Taiwan country chickens in response to acute heat stress. *Theriogenology*. 2016; 85(3): 483–494.e8. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.09.028>
87. Fang X.-L. *et al.* Differential gene expression pattern in hypothalamus of chickens during fasting-induced metabolic reprogramming: Functions of glucose and lipid metabolism in the feed intake of chickens. *Poultry Science*. 2014; 93(11): 2841–2854. <https://doi.org/10.3382/ps.2014-04047>

88. Badakhshan Y., Roudbari Z. The changes in hypothalamic mRNA transcription of genes related to behavior and feeding in incubating and laying hens: based on RNAseq Data. *Journal of Epigenetics*. 2024; 5(1): 32–40.
<https://doi.org/10.22111/jep.2024.47868.1067>

ОБ АВТОРАХ

Артем Павлович Дысин

младший научный сотрудник

artemdysin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4468-0365>

Ольга Юрьевна Баркова

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

<https://orcid.org/0000-0002-0963-905X>

barkoffws@list.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста, Московское шоссе, 55А, Пушкин, Санкт-Петербург, 196625, Россия

88. Badakhshan Y., Roudbari Z. The changes in hypothalamic mRNA transcription of genes related to behavior and feeding in incubating and laying hens: based on RNAseq Data. *Journal of Epigenetics*. 2024; 5(1): 32–40.
<https://doi.org/10.22111/jep.2024.47868.1067>

ABOUT THE AUTHORS

Artyom Pavlovich Dysin

Junior Researcher

artemdysin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4468-0365>

Olga Yurievna Barkova

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher

<https://orcid.org/0000-0002-0963-905X>

barkoffws@list.ru

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding — Branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,

55A Moskovskoe highway, Pushkin,
St. Petersburg, 196625, Russia

УДК 633.162:631.8: 633.11

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-159-166

Н.А. Рябцева

Донской государственный аграрный
университет, пос. Персиановский,
Ростовская обл., Россия

✉ rjbtseva@mail.ru

Поступила в редакцию: 20.08.2025

Одобрена после рецензирования: 13.09.2025

Принята к публикации: 28.09.2025

© Рябцева Н.А.

Влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя и озимой пшеницы

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В Ростовской области в последние несколько лет наблюдается тенденция аномалии погодных условий, вызывающих засуху. Сглаживание негативных факторов возможно путем управления агроценозом, в том числе за счет биологических препаратов и подбором сортов.

Методы. Исследования проведены в 2022–2025 сельскохозяйственных годах в условиях Ростовской области. Опыт 1-й — в Приазовской зоне на черноземных почвах. Изучали сорт ярового ячменя Леон и биорегуляторы роста «Артафит», «Биодукс», «Оберегъ», «Тренер», «Фульвогумат». Опыт 2-й — в восточной зоне на каштановых почвах. Изучали сорта пшеницы Станичная и Лидия и биорегуляторы роста «ГуматАктив», «Альбит», «Вигор Форте».

Результаты. В условиях опыта растения сформировали невысокопродуктивные агроценозы за счет невысокой всхожести семян (90% у ячменя и 88,2% у пшеницы), выживаемости к уборке (76% и 75% соответственно), продуктивной кустистости (1,2 и 1,25), массы 1000 зерен (41,8 г и 40,9 г) и, как следствие, урожайности зерна ячменя 2,5–3,8 т/га и пшеницы 3,15–4,38 т/га. По совокупности положительного влияния биологических регуляторов роста на рентабельность и продуктивность агроценозов ярового ячменя рекомендуем препараты «Биодукс» и «Оберегъ» по вегетации в фазу кущения, на озимой пшенице применение препаратов «Вигор Форте» в предпосевной подготовке семян и «Альбит» в фазу кущения.

Ключевые слова: яровой ячмень, озимая пшеница, биологический регулятор роста растений

Для цитирования: Рябцева Н.А. Влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя и озимой пшеницы. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 159–166.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-159-166>

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-159-166

Natalia A. Ryabtseva

Don State Agrarian University,
Persianovsky settlement, Rostov region,
Russia

✉ rjbtseva@mail.ru

Received by the editorial office: 20.08.2025

Accepted in revised: 13.09.2025

Accepted for publication: 28.09.2025

© Ryabtseva N.A.

The influence of biological growth regulators on the productivity of agroecosystems of spring barley and winter wheat

ABSTRACT

Relevance. Over the past few years, the Rostov region has been experiencing a trend of abnormal weather conditions causing drought. Smoothing out negative factors is possible by managing the agroecosystem, including through biological preparations and selection of varieties.

Methods. The research was conducted in the agricultural years 2022–2025 in the Rostov region. The 1st experiment was conducted in the Azov Sea zone on chernozem soils. The Leon variety of spring barley and the bioregulators of growth “Artafit”, “Biodux”, “Obereg”, “Trainer”, “Fulvohumat” were studied. The 2nd experiment was conducted in the eastern zone on chestnut soils. Wheat varieties Stanichnaya and Lydia and bioregulators of growth “HumatAktiv”, “Albit”, “Vigor Forte” were studied.

Results. Under experimental conditions, the plants formed non-highly productive agroecosystems due to low seed germination (90% in barley and 88,2% in wheat), survival rate for harvesting (76% and 75%, respectively), productive bushiness coefficient (1,2 and 1,25), weight of 1000 grains (41,8 g and 40,9 g). As a result, the yield of barley grain is 2,5–3,8 t/ha and wheat 3,15–4,38 t/ha. According to the combination of positive effects of biological growth regulators on the profitability and productivity of agroecosystems of spring barley, we recommend the preparations “Biodux” and “Obereg” during the growing season during the tillering phase, on winter wheat, the use of “Vigor Forte” preparations in the pre-sowing preparation of seeds and “Albit” during the tillering phase.

Key words: spring barley, winter wheat, biological plant growth regulator

For citation: Ryabtseva N.A. The influence of biological growth regulators on the productivity of agroecosystems of spring barley and winter wheat. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 159–166 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-159-166>

Введение/Introduction

Зерновые культуры (озимая пшеница и яровой ячмень, в частности) имеют важное значение в разных сферах. Для населения это основной продукт питания и создание производственной безопасности страны, для животноводства — основа рациона питания, для промышленности — сырье для переработки. В последние годы актуально научное обоснование путей повышения продуктивности ярового ячменя и озимой пшеницы [1].

Ввиду повышения затрат на производство сельскохозяйственной продукции аграрии в поиске путей их снижения. Один из них — применение различных биологических регуляторов роста и развития растений [2].

Учеными в Нечерноземной зоне выявлено положительное влияние эфлюента (побочного продукта переработки навоза) на урожайность ярового ячменя, отмечены сокращение длины вегетационного периода. Отрицательного воздействия на элементы структуры продуктивности не выявлено [3].

Гуминовые препараты положительно влияют на рост и развитие ярового ячменя, показатели структуры урожая и посевные качества семян на темно-серых лесных почвах Рязанской области. Прибавка урожайности составила 0,27 т/га [4].

Большое значение имеет предпосевная обработка семян для их защиты и стимуляции роста. Это подтверждают исследования Н.Н. Беляева, Е.А. Дубинкиной, А.В. Шабалкина в условиях Центрально-Черноземного региона. Прибавка урожайности ячменя по отношению к контролю 13,7–17,1% [5].

Н.И. Воскобулова и соавт. доказали опытным путем эффективность предпосевной обработки семян ярового ячменя регуляторами роста в условиях дефицита влаги в засушливых условиях степной зоны Оренбургской области (прибавка урожайности 1 ц/га) [8].

Ученые отмечают эффективность и экологическую безопасность гуминовых фитобиокомплексов в технологии выращивания ярового ячменя (прибавка урожайности зерна 0,554 т/га) [9].

Регуляторы роста и развития оптимизируют развитие колосовых культур, повышая урожайность за счет высокой всхожести семян и выживаемости растений к уборке, повышая устойчивость культур к неблагоприятным факторам среды. Опыты в Орловской области показали улучшение условий роста и развития ячменя, что привело к увеличению урожайности на 11–14%, густоты продуктивного стеблестоя на 10%, массы и количества зерен в колосе на 13% и 18% соответственно [10].

В Ростовской области биопрепараты стимулировали рост продуктивных стеблей ярового ячменя на 1,28–1,33, массу 1000 зерен на 2,9 г, количество зерен в колосе на 1 шт. [11, 12].

Под воздействием биопрепаратов увеличиваются кущение растений, длина колоса, количество зерен в колосе и масса 1000 зерен и, как следствие, урожайность. Так, ученые выявили положительное действие биопрепарата на основе бактерий и грибов-антагонистов патогенной микрофлоры и продуктов их жизнедеятельности («Витаплан СП», «АгроБиоТехнология», Россия) на урожайность озимой пшеницы Центрального Черноземья [13].

Ученые Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук РСО — Алания» не выявили разницу в прибавках урожая озимой пшеницы после некорневых подкормок регулятором роста «Сапресс, КЭ», Cheminova A/S, Дания) [14, 15].

Установлено, что испытания биологических препаратов на посевах ячменя в Нечерноземной зоне ИСА — филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ оказали положительное влияние на его рост и развитие. На вариантах с применением биопрепаратов сохранность растений к уборке 91,6–92,9%, что выше хозяйственного варианта на 2,3–3,6% и контрольного варианта на 4,4–5,7%, показала, что в среднем за три года продуктивность ярового ячменя сорта Яромир повысилась на 9,0–18,2% [16].

Ростовская область расположена в степной зоне рискованного земледелия и в последние годы остро страдает из-за засухи и возвращающихся весенних заморозков. В связи с этим такое изменение климата оказывает негативное влияние на сельское хозяйство. Потери урожайности в 2025 году зерновых составили 30% по сравнению с предыдущим¹.

Управление в агроценозе для сглаживания негативного влияния вышеупомянутых факторов возможно, в том числе с использованием подбора сортов и биологических регуляторов роста растений. Считаем данное направление исследований актуальным и необходимым для расширения знаний и уточнения агротехнологий.

Цель исследования — изучить влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя и озимой пшеницы.

Это предусматривает следующие задачи: изучить всхожесть и выживаемость растений, коэффициент продуктивной кустистости, количество зерен в колосе, массу 1000 зерен, урожайность зерна, рентабельность производства.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в 2022–2025 годах в Ростовской области. Были проведены 2 эксперимента.

Опыт 1-й. Изучали влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя в условиях Приазовской зоны на черноземе обыкновенном¹. Норма посева ярового

¹ «Агро инвестор».

Режим доступа: <https://www.agroinvestor.ru/markets/article/43584-zhttps://www.agroinvestor.ru/markets/article/43584-zernovye-ne-stali-dokhodnee-itogi-pervoy-pолоviny-sezona-2024-25/?ysclid=mewr7vgee215083298ernovye-ne-stali-dokhodnee-itogi-pervoy-pолоviny-sezona-2024-25/?ysclid=mewr7vgee215083298>

ячменя — 4,5 млн всхожих семян на 1 га рядовым способом ручной сеялкой «Пахарь» (ООО «Пахарь», Россия) в рекомендуемые сроки, предшественник — подсолнечник. Делянки (25 м²) размещены последовательно в четырехкратной повторности. Технология выращивания рекомендована Н.Н. Вошедским, И.Н. Ильинской, О.А. Целуйко и др. (2022 г.) и разработана Аграрным научным центром «Донской»². В системе удобрений и защите растений использовали: под вспашку (октябрь) — «Аммофос» (130 кг/га), «Сульфат аммония» (200 кг/га) — май; «Статус Макс, ВДГ» (0,04 кг/га), «Альтерр, КЭ» (0,10 кг/га), «Новус-Ф, КС» (0,60 л/га) — май; «Фильтерр, КЭ» (0,50 л/га), «Альтерр, КЭ» (0,10 л/га) — май; «Органза, КС» (0,15 л/га) — июнь.

Объект исследования — сорт ярового ячменя Леон³ (производитель «АгроМир-Сидс». Оригинатор семян — Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко, г. Краснодар, Россия), а также биологические регуляторы роста⁴:

✓ «Артафит» (полидиаллилдиметиламмоний хлорид, 0,3 л/га) (ООО «НПИЦ БиоГрадис», Россия),

✓ «Биодукс» (арахионовая кислота, 3 мл/га) (ООО «Органик парк», Россия),

✓ «ОберегЪ» (арахионовая кислота, 60 мл/га) (ООО «ОРТОН», Россия),

✓ «Тренер» (растительные пептиды и аминокислоты, олигосахариды, 3 л/га) (ITALPOLLINA, Италия),

✓ «Фульвогумат» (раствор природных гуминовых и фульвокислот, экстрагированных из леонардита, с аминокислотами и микроэлементами в хелатной форме, 0,4 л/га) (ООО НПО «Альфа-Групп», Россия).

Биопрепараты применяли в фазы кушения и колошения (опрыскивание растений по листу, расход рабочей жидкости — 300 л/га).

Опыт 2-й. Изучали влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов озимой пшеницы в условиях восточной зоны на каштановых почвах⁵. Посев пшеницы по пару осуществлен зерновой сеялкой (4 млн. шт/га) на глубину 4–6 см. Делянки (33 м²) размещены последовательно в трехкратной повторности. Технология выращивания рекомендована Н.Н. Вошедским, И.Н. Ильинской, О.А. Целуйко и др. (2022 г.) и разработана Аграрным научным центром

«Донской»⁶. В системе удобрений и защите растений использовали: под культивацию (август) — «Аммофос» (130 кг/га), «Сульфат аммония» (200 кг/га) дважды: декабрь — январь, март — апрель; «Карбамид» (18 кг/га) — март — апрель; «Статус Макс, ВДГ» (0,04 кг/га), «Альтерр, КЭ» (0,10 кг/га), «Новус-Ф, КС» (0,60 л/га) — март — апрель; «Фильтерр, КЭ» (0,50 л/га), «Альтерр, КЭ» (0,10 л/га) — май; «Органза, КС» (0,15 л/га) — июнь.

Объекты исследований — сорта пшеницы Станичная и Лидия⁷. Оригинатор семян — ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»» (г. Зерноград, Россия), выбраны с учетом предпочтений хозяйства и препараты⁸:

✓ «ГуматАктив» (гуминовые и фульвокислоты, 1 л/т) (ООО «Сельскохозяйственное предприятие «Нива»», Россия),

✓ «Альбит» (полибетагидроксимасляная кислота + магний серноокислый + калий фосфорнокислый + калий азотнокислый + карбамид, 0,04 л/т, 0,04 л/га) (ООО «НПФ «Альбит»», Россия),

✓ «Вигор Форте» (триэтаноламмоний соль ортокрезоксиуксусной кислоты + магний азотнокислый + калий азотнокислый + монокалийфосфат + хелат железа + хелат марганца + хелат цинка + хелат меди + борная кислота + аммоний молибденовокислый, 25 г/т, 25 г/га) (ООО «Ватр», Россия).

Предпосевная подготовка всех семян в день посева — инсектицид «Сабля» (тиаметоксам, ООО «Агрохим-XXI», Россия) — 0,75 л/т (фон), весной использовали по вегетации «Костандо» (тринексапак-этил, АО «Щёлково Агрохим», Россия) — 0,4 л/га.

В качестве контроля — предпосевная обработка семян «Сабля» (тиаметоксам, ООО «Агрохим-XXI», Россия) + «ГуматАктив» (гуминовые и фульвокислоты, ООО «Сельскохозяйственное предприятие «Нива»», Россия).

Биопрепараты применяли в фазу кушения (опрыскивание растений по листу, расход рабочей жидкости — 300 л/га).

В исследованиях использовали следующую методику: закладка опыта, наблюдения за ростом и развитием (всхожесть, выживаемость, кушение, количество зерен в колосе, урожайность)⁹, масса 1000 зерен¹⁰, рентабельность¹¹.

² Агафонов Е.В., Полуэктов Е.В. Почвы и удобрения Ростовской области. Ростов-на-Дону. 1995; 284.

³ Эколого-адаптивная технология возделывания новых сортов озимой пшеницы для различных типов агроландшафтов Ростовской области: рекомендации / Н.Н. Вошедский, И.Н. Ильинская, О.А. Целуйко и др. ФГБНУ ФРАНЦ. пос. Рассвет: Азов Принт. 2022; 68.

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений».

Режим доступа: <https://reestr.gossortrf.ru/sorts/9052841>

⁵ Справочник пестицидов и агрохимикатов — АгроXXI.

Режим доступа: <https://www.agroxxi.ru/goshandbook?ysclid=meigh9ik8w358580293>

⁶ Агафонов Е.В., Полуэктов Е.В. Почвы и удобрения Ростовской области. Ростов-на-Дону. 1995; 284.

⁷ Эколого-адаптивная технология возделывания новых сортов озимой пшеницы для различных типов агроландшафтов Ростовской области: рекомендации / Н.Н. Вошедский, И.Н. Ильинская, О.А. Целуйко и др. ФГБНУ ФРАНЦ. пос. Рассвет: Азов Принт. 2022; 68.

⁸ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений».

Режим доступа: <https://reestr.gossortrf.ru/sorts/9052841>

⁹ Справочник пестицидов и агрохимикатов «АгроXXI».

Режим доступа: <https://www.agroxxi.ru/goshandbook?ysclid=meigh9ik8w358580293>

¹⁰ Федин М.А. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Москва. 1983; 3.

¹¹ ГОСТ 10842-89 Зерно зерновых и бобовых культур и семена масличных культур. Метод определения массы 1000 зерен или 1000 семян.

Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/28508/?ysclid=meig5jp8nb585618683>

Статистическую обработку данных (дисперсионный анализ и доверительный интервал для среднего значения выживаемости растений к уборке — процент растений от количества высеванных семян; коэффициент кущения — количество стеблей с колосом на одном растении, количество зерен в колосе (среднее количество зерен в колосе у растений с 1 м²) и масса 1000 зерен, урожайность (НСР₀₅) проводили с использованием Microsoft Excel (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Погодные условия в годы опыта были сложными с точки зрения возрастания сумм температур на 14,6–18,8 °С по сравнению со среднегодовыми, а также осадков в 2024/25 с.-х. году в 2 раза было меньше нормы. Относительно благополучно складывались условия увлажнения в 2023 и 2024 гг., превышение нормы составило 84 мм. Эти условия повлияли на рост и развитие растений. Так, всхожесть ярового ячменя в 2023 году — 92%, в 2024-м — 86%, в 2025-м — 92%. Всхожесть озимой пшеницы составила в 2023 году 84–95%, в 2024-м — 84–90%, в 2025-м — 83–89%.

Выживаемость растений ярового ячменя и озимой пшеницы представлена в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Выживаемость растений ярового ячменя, %
Table 1. Survival rate of spring barley plants, %

Вариант	Выживаемость к уборке, %			Доверительный интервал для среднего значения
	2023 г.	2024 г.	2025 г.	
Контроль	76	70	68	71 ± 4
«Биодукс»	85	78	75	79 ± 3
«Тренер»	78	75	73	75 ± 2
«Артафит»	80	76	75	77 ± 2
«ОберегЪ»	84	78	75	79 ± 3
«Фульвогумат»	77	75	72	75 ± 1
НСР ₀₅	1	2	2	

Таблица 2. Выживаемость озимой пшеницы к уборке, %
Table 2. Survival rate of winter wheat for harvesting, %

Сорт (фактор А)	Регулятор роста (фактор В)		Выживаемость к уборке, %			
	предпосевная обработка семян	Обработка по вегетации (весна)	2023 г.	2024 г.	2025 г.	доверительный интервал для среднего значения
Станичная	«ГуматАктив» (К)	–	75	70	65	70 ± 4
	«Альбит»	«Альбит»	77	72	70	73 ± 3
	«Альбит»	«Вигор Форте»	79	73	72	75 ± 3
	«Вигор Форте»	«Альбит»	80	75	72	76 ± 3
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	78	72	72	74 ± 3
Лидия	ГуматАктив (К)	–	74	70	65	70 ± 4
	«Альбит»	«Альбит»	76	71	69	72 ± 3
	«Альбит»	«Вигор Форте»	78	74	72	75 ± 3
	«Вигор Форте»	«Альбит»	80	73	72	75 ± 4
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	77	71	71	73 ± 3
НСР _{05 А}			1	1	1	
НСР _{05 В}			2	1	2	
НСР _{05 АВ}			1	1	2	

Анализ данных показал, что наибольшая выживаемость растений ячменя была в 2023 году — 76–85%. Ниже показатели были в 2024 году — 70–78%. Наименьший показатель выживаемости наблюдали в 2025 году — 68–75%. Использование биопрепаратов по вегетации ячменя способствовало увеличению выживаемости растений, особенно с препаратом «Биодукс» и «ОберегЪ» в 2023 году. В 2024 году влияние биопрепаратов на выживаемость было минимальным (до 5%). В 2025 году биопрепараты «Биодукс», «Артафит» и «ОберегЪ» оказали положительное влияние на выживаемость к уборке.

В годы опыта достоверно доказано влияние биопрепаратов на выживаемость растений ярового ячменя к уборке. В среднем за годы опытов наибольшая выживаемость была на варианте с применением препаратов «Биодукс» и «ОберегЪ», доверительный интервал для среднего значения с вероятностью 95% — 76–82%.

Анализ данных опыта показал, что наибольшая выживаемость растений была в 2023 году — 74–80%, достоверно доказано влияние биопрепаратов на выживаемость растений озимой пшеницы к уборке по всем факторам и при их взаимодействии. Ниже показатели были в 2024 году — 70–75%. Наименьший показатель выживаемости наблюдали в 2025 году — 85–72%. В 2024 и 2025 гг. достоверно доказано влияние биопрепаратов на выживаемость растений озимой пшеницы к уборке по фактору В (регулятор роста). В среднем за годы опыта выживаемость пшеницы к уборке варьировала от 70 до 76%. Лучший показатель отмечен на варианте «Вигор Форте» + «Альбит» у сорта Станичная, доверительный интервал для среднего значения 73–79%.

Наблюдения за продуктивной кустистостью растений ячменя показали, что в 2023 году она была наибольшей — 1,3–1,5, в 2024-м — 1,2, в 2025-м — 1,2–1,3. В среднем за годы опыта продуктивная кустистость составила 1,2 на контроле и 1,3 с применением биопрепаратов. В 2023 и 2025 годах действие биопрепаратов на коэффициент продуктивной кустистости ячменя достоверно доказано на всех вариантах, НСР₀₅ (0,1) (рис. 1).

У растений озимой пшеницы коэффициент продуктивной кустистости в среднем за годы опыта варьировал от 1,2 до 1,3. В условиях 2023 года продуктивная кустистость была в пределах 1,2–1,4, а в 2024 и 2025 гг. — 1,2–1,3 (табл. 3).

Рис. 1. Коэффициент продуктивной кустистости ярового ячменя
Fig. 1. Coefficient of productive bushiness of spring barley

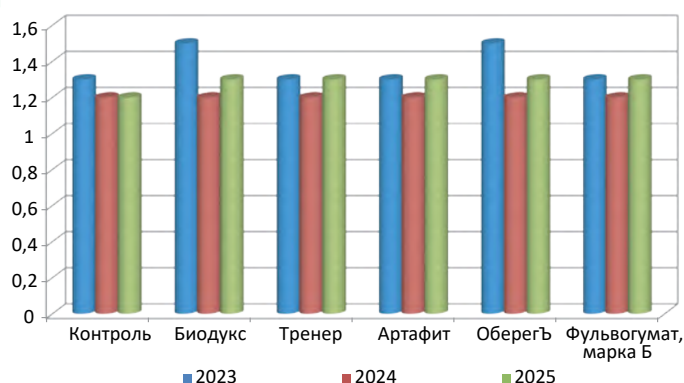


Таблица 3. Коэффициент продуктивной кустистости озимой пшеницы
Table 3. Coefficient of productive bushiness of winter wheat

Сорт (фактор А)	Регулятор роста (фактор В)		Продуктивная кустистость		
	предпосевная обработка семян	обработка по вегетации (весна)	2023 г.	2024 г.	2025 г.
Станичная	«ГуматАктив» (К) –		1,2	1,2	1,2
	«Альбит»	«Альбит»	1,3	1,2	1,2
	«Альбит»	«Вигор Форте»	1,3	1,2	1,2
	«Вигор Форте»	«Альбит»	1,4	1,3	1,3
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	1,3	1,2	1,2
Лидия	«ГуматАктив» (К) –		1,2	1,2	1,2
	«Альбит»	«Альбит»	1,3	1,2	1,2
	«Альбит»	«Вигор Форте»	1,3	1,2	1,2
	«Вигор Форте»	«Альбит»	1,4	1,3	1,3
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	1,3	1,2	1,2
НСР _{05 А}			0,2	0,2	0,3
НСР _{05 В}			0,3	0,2	0,2
НСР _{05 АВ}			0,3	0,3	0,3

Наибольшая продуктивная кустистость растений озимой пшеницы была на варианте с совместным применением биопрепаратов «Вигор Форте» и «Альбит» — 1,3. В 2023 и 2025 годах действие биопрепаратов на коэффициент продуктивной кустистости достоверно доказано на всех вариантах, НСР₀₅ (0,1).

Анализ данных показал, что в среднем за годы опыта наибольшие показатели по количеству зерен в колосе и массе 1000 зерен были на варианте с использованием биопрепаратов «Биодукс» и «Оберегъ», наименьший показатель — на контроле (табл. 4). В годы опытов действие биопрепаратов на массу 1000 зерен и количество их в колосе ячменя достоверно доказано на всех вариантах.

В среднем за годы опыта масса 1000 зерен озимой пшеницы варьировала от 40,5 до 41,9 г при среднем их количестве в колосе 27,3–28 шт. Наибольшее значение отмечено у сорта Станичная с использованием препаратов «Вигор Форте» и «Альбит» и у сорта Лидия — «Вигор Форте» + «Альбит»,

«Альбит» + «Вигор Форте» — 28 шт. Наиболее тяжеловесное зерно сформировал сорт Станичная с применением препаратов «Вигор Форте» и «Альбит» — 41,9 г (табл. 5).

Достоверно доказано на 95%-ном уровне значимости действие биопрепаратов на количество зерен в колосе по фактору В и на массу 1000 зерен по факторам А и В. При взаимодействии факторов существенного влияния на данные показатели не выявлено.

Использование биорегуляторов роста «Биодукс» и «Оберегъ» позволило в сложных условиях получить урожайность ярового ячменя на уровне 3,8–3,86 т/га с рентабельностью 23,2% и 14,6% соответственно. Нерентабельным оказалось применение препаратов «Тренер» и «Фульвогумат» (табл. 6).

Достоверно доказано влияние биопрепаратов на урожайность ярового ячменя во все годы опыта.

Таблица 4. Масса 1000 зерен ярового ячменя и их количество в колосе (2023–2025 гг.)
Table 4. Weight of 1000 grains of spring barley and their quantity per ear (2023–2025)

Вариант	Масса 1000 зерен, г	Количество зерен в колосе, шт.
Контроль	41,2	15,3
«Биодукс»	42,3	17,3
«Тренер»	41,8	16,0
«Артафит»	41,9	16,0
«Оберегъ»	42,1	17,0
«Фульвогумат»	41,7	16,3
НСР ₀₅	0,1	1,0

Таблица 5. Масса 1000 зерен озимой пшеницы и их количество в колосе (2023–2025 гг.)
Table 5. Weight of 1000 grains of winter wheat and their quantity per ear (2023–2025)

Сорт (фактор А)	Регулятор роста (фактор В)		Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г
	предпосевная обработка семян	обработка по вегетации (весна)		
Станичная	«ГуматАктив» (К) –		27,3	40,5
	«Альбит»	«Альбит»	27,3	40,4
	«Альбит»	«Вигор Форте»	27,3	41,0
	«Вигор Форте»	«Альбит»	28,0	41,9
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	27,3	41,0
Лидия	«ГуматАктив» (К) –		27,3	41,1
	«Альбит»	«Альбит»	27,3	40,9
	«Альбит»	«Вигор Форте»	28,0	40,6
	«Вигор Форте»	«Альбит»	28,0	41,1
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	27,3	40,7
НСР _{05 А}			0,3	0,1
НСР _{05 В}			0,2	0,2
НСР _{05 АВ}			0,2	0,2

Таблица 6. Урожайность и рентабельность ярового ячменя

Table 6. Yield and profitability of spring barley

Вариант	Урожайность, т/га				Рентабельность, %			
	2023 г.	2024 г.	2025 г.	доверительный интервал для среднего значения	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023–2025 гг.
Контроль	3,06	2,12	2,26	2,48 ± 0,44	22,4	-28,6	10,1	1,3
«Биодукс»	4,98	3,80	2,80	3,86 ± 0,86	71,8	-22,0	19,7	23,2
«Тренер»	3,43	2,90	2,69	3,01 ± 0,32	-26,0	-54,8	4,5	-25,4
«Артафит»	3,54	2,92	2,78	3,08 ± 0,35	20,8	-32,4	31,3	6,6
«Оберегъ»	4,82	3,76	2,81	3,80 ± 0,77	60,8	-33,5	16,5	14,6
«Фульвогумат»	3,58	2,95	2,68	3,07 ± 0,38	20,0	-31,9	11,6	-0,1
НСР ₀₅	0,5	0,07	0,19					

Таблица 7. Урожайность и рентабельность озимой пшеницы

Table 7. Yield and profitability of winter wheat

Сорт (фактор А)	Регулятор роста (фактор В)		Урожайность, т/га				Рентабельность, %			
	предпосевная обработка семян	обработка по вегетации (весна)	2023 г.	2024 г.	2025 г.	доверительный интервал для среднего значения	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2023–2025 гг.
Станичная	«ГуматАктив» (К)	–	3,44	3,30	2,73	3,15 ± 0,32	24,9	11,9	-4,03	10,9
	«Альбит»	«Альбит»	4,00	3,37	3,01	3,46 ± 0,41	40,9	11,9	3,59	18,8
	«Альбит»	«Вигор Форте»	4,15	3,52	3,11	3,59 ± 0,42	45,3	16,1	6,26	22,5
	«Вигор Форте»	«Альбит»	5,49	4,10	3,55	4,38 ± 0,84	87,1	33,9	20,52	47,1
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	4,51	3,57	3,19	3,76 ± 0,57	56,1	17,3	8,47	27,3
Лидия	«ГуматАктив» (К)	–	3,48	3,29	2,71	3,16 ± 0,34	28,0	12,2	-4,02	12,1
	«Альбит»	«Альбит»	4,00	3,40	2,99	3,46 ± 0,40	42,6	13,5	3,58	19,9
	«Альбит»	«Вигор Форте»	4,36	3,48	3,11	3,65 ± 0,54	54,0	15,7	7,21	25,6
	«Вигор Форте»	«Альбит»	5,18	3,83	3,51	4,17 ± 0,76	79,8	26,4	19,92	42,1
	«Вигор Форте»	«Вигор Форте»	4,15	3,50	3,13	3,59 ± 0,42	46,5	15,8	7,50	23,3
НСР _{05 A}			1,38	0,53	0,89					
НСР _{05 B}			0,88	0,34	0,56					
НСР _{05 AB}			0,74	0,28	0,48					

Анализ данных урожайности озимой пшеницы показал, что в среднем за годы опытов наибольшие показатели наблюдали на варианте с комплексным применением «Вигор Форте» и «Альбит» (4,17 т/га и 4,38 т/га). Аналогичные данные получены и по рентабельности выращивания культуры (42,1% и 47,1% соответственно) (табл. 7).

Достоверно доказано влияние биопрепаратов на урожайность озимой пшеницы во все годы опыта.

Выводы/Conclusions

Опытным путем установлено влияние биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя и озимой пшеницы в условиях Ростовской области.

В условиях опыта 2022–2025 гг. растения ярового ячменя и озимой пшеницы сформировали невысокопродуктивные агроценозы за счет невысокой всхожести семян (90% у ячменя и 88,2% у пшеницы), выживаемости к уборке (76% у ячменя и 75% у пшеницы), продуктивной кустистости (1,2 у ячменя и 1,3 у пшеницы), количества зерен

в колосе (16,3 шт. у ячменя и 27,5 шт. у пшеницы), массы 1000 зерен (41,8 г у ячменя и 40,9 г у пшеницы) и, как следствие, низкой урожайности зерна ячменя (2,5–3,8 т/га) и пшеницы (3,15–4,38 т/га).

Достоверно доказано на 95%-ном уровне значимости влияние биопрепаратов на урожайность ярового ячменя и озимой пшеницы во все годы опыта. Рентабельность возделывания пшеницы сортов Станичная и Лидия оказалась положительной во всех вариантах с изучаемыми биопрепаратами (10,9–47,1%), у ячменя сорта Леон, кроме применения препаратов «Тренер» (ITALPOLLINA, Италия) и «Фульвогумат» (ООО НПО «Альфа-Групп», Россия).

Таким образом, по совокупности наибольшего положительного влияния биологических регуляторов роста на продуктивность агроценозов ярового ячменя рекомендуем препараты «Биодукс» (ООО «Органик парк», Россия) и «Оберегъ» (ООО «ОРТОН», Россия) в фазу кущения, на озимой пшенице — препараты «Вигор Форте» (ООО «Ватр») в предпосевной подготовке семян и «Альбит» (ООО «НПФ «Альбит»») в фазу кущения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ламмас М.Е., Шитикова А.В., Савоскина О.А. Роль биостимуляторов роста в получении высококачественного урожая ярового ячменя. *АгроЭкоИнфо*. 2022; (6). <https://www.elibrary.ru/yrifqe>
2. Фетухин И.В., Авдеев А.П., Авдеев С.С., Рябцева Н.А. Использование средств биологизации в повышении продуктивности и экологической устойчивости агроландшафтов. Монография. Персиановский: *Донской ГАУ*. 2024; 219. ISBN 978-5-98252-459-1 <https://www.elibrary.ru/xjifza>
3. Курбанов Р.Ф., Созонтов А.В., Лыбенко Е.С. Влияние эфлюента на рост и развитие ярового ячменя в условиях северо-востока Нечерноземной зоны России. *Пермский аграрный вестник*. 2021; (3): 43–52. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2021_35_43
4. Лупова Е.И., Питурин И.С., Виноградов Д.В., Балабко П.Н., Гогмачадзе Г.Д. Использование гуматов в технологии производства ярового ячменя. *АгроЭкоИнфо*. 2023; (1). <https://www.elibrary.ru/qotfwu>
5. Беляев Н.Н., Дубинкина Е.А., Шабалкин А.В. Эффективность предпосевной обработки семян ярового ячменя композиционными смесями в условиях Центрально-Черноземного региона. *Аграрная Россия*. 2018; (12): 8–12. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2018-12-8-12>
6. Воскобулова Н.И., Неверов А.А., Яичкин В.Н. Эффективность предпосевной обработки семян ярового ячменя регуляторами роста в условиях дефицита влаги. *Животноводство и кормопроизводство*. 2019; 102(2): 151–162. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-102-2-151>
7. Комарицкая Е.И., Засорина Э.В. Влияние протравителей линейки «Максим» на сортовую продуктивность озимой пшеницы. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022; (2): 69–73. <https://elibrary.ru/mpwhjv>
8. Дубинкина Е.А., Шабалкин А.В. Влияние предпосевной обработки семян ярового ячменя регуляторами роста на продуктивность и ростовые процессы в условиях ЦЧР. *Сахарная свекла*. 2025; (2): 23–26. <https://doi.org/10.25802/SB.2025.10.87.004>
9. Виноградова В.С., Козина А.А., Влаха А., Скрыбин А.С. Эффективность гуминовых фитобиокомплексов в технологии выращивания ярового ячменя. Наука России: цели и задачи. Сборник научных трудов по материалам XVII Международной научной конференции. Екатеринбург. 2019; 1: 36–39. <https://www.elibrary.ru/igujeu>
10. Тychinskaya И.Л., Зеленев А.А., Мерцалов Е.Н., Михалева Е.С. Влияние препаратов «Биоклад» и «Вермикс» на элементы продуктивности, урожайность и качественные показатели ярового ячменя. *Земледелие*. 2021; (4): 7–10. <https://www.elibrary.ru/onmfyf>
11. Рябцева Н.А., Стрельцов А.А. Формирование высокопродуктивных агроценозов ярового ячменя под влиянием росторегулирующих веществ в Ростовской области. *Известия Дагестанского ГАУ*. 2023; (1): 72–79. https://doi.org/10.52671/26867591_2023_1_72
12. Рябцева Н.А. Влияние биопрепаратов на формирование элементов продуктивности ярового ячменя. *Аграрная наука*. 2021; (11–12): 72–75. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-72-75>
13. Долгополова Н.В., Киреев Б.А. Влияние биопрепаратов на урожайность озимой пшеницы Центрального Черноземья. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023; (5): 29–35. <https://elibrary.ru/lrzeka>
14. Шалыгина А.А., Тедеева А.А. Влияние регуляторов роста на структуру урожая озимой пшеницы. *Аграрная наука*. 2021; (4): 64–67. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-348-4-64-67>
15. Kibkalo I. Effectiveness of and Perspectives for the Sedimentation Analysis Method in Grain Quality Evaluation in Various Cereal Crops for Breeding Purposes. *Plants*. 2022; 11(13): 1640. <https://doi.org/10.3390/plants11131640>
16. Захарова М.Н., Рожкова Л.В. Влияние биопрепаратов на продуктивность ярового ячменя сорта Яромир в Нечерноземной зоне. *Аграрная наука*. 2025; (7): 146–150. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-146-150>

REFERENCES

1. Lammas M.E., Shitikova A.V., Savoskina O.A. The role of growth biostimulators in obtaining a high-quality crop of spring barley plants. *AgroEcolInfo*. 2022; (6) (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yrifqe>
2. Fetyukhin I.V., Avdeyenko A.P., Avdeyenko S.S., Ryabtseva N.A. The use of biologization tools in increasing productivity and environmental sustainability of agricultural landscapes. Monograph. Persianovski: *Don State Agrarian University*. 2024; 219 (in Russian). ISBN 978-5-98252-459-1 <https://www.elibrary.ru/xjifza>
3. Kurbanov R.F., Sozontov A.V., Lybenko E.S. Influence of an effluent on growth and development of spring barley in the conditions of the North-East of the Non-Chernozem zone of Russia. *Perm Agrarian journal*. 2021; (3): 43–52 (in Russian). https://doi.org/10.47737/2307-2873_2021_35_43
4. Lupova E.I., Pityurina I.S., Vinogradov D.V., Balabko P.N., Gogmachadze G.D. The use of humates in the technology of spring barley production. *AgroEcolInfo*. 2023; (1) (in Russian). <https://www.elibrary.ru/qotfwu>
5. Belyaev N.N., Dubinina E.A., Shabalkin A.V. Efficiency of presowing treatment of spring barley seeds with composite mixtures under conditions of the Central-Chernozem region. *Agrarian Russia*. 2018; (12): 8–12 (in Russian). <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2018-12-8-12>
6. Voskobulova N.I., Neverov A.A., Yaichkin V.N. The effectiveness of pre-sowing treatment of seeds of spring barley with growth regulators in conditions of moisture deficiency. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019; 102(2): 151–162 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-102-2-151>
7. Komaritskaya E.I., Zazorina E.V. The influence of “Maxim” protectants on the varietal productivity of winter wheat. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*. 2022; (2): 69–73 (in Russian). <https://elibrary.ru/mpwhjv>
8. Dubinkina E.A., Shabalkin A.V. The effect of pre-sowing treatment of spring barley seeds with growth regulators on productivity and growth processes in the Black-Earth region conditions. *Sakharaya svekla*. 2025; (2): 23–26 (in Russian). <https://doi.org/10.25802/SB.2025.10.87.004>
9. Vinogradova V.S., Kozina A.A., Vlakh A., Scryabin A.S. The effectiveness of humic phytobiocomplexes in the technology of growing spring barley. *Russian Science: goals and objectives. Collection of scientific papers based on the materials of the XVII International scientific conference*. Yekaterinburg. 2019; 1: 36–39 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/igujeu>
10. Tychinskaya I.L., Zelenov A.A., Mertsalov E.N., Mikhaleva E.S. Influence of “Bioclad” and “Vermix” preparations on the elements of productivity, productivity and quality indicators of spring barley. *Zemledelie*. 2021; (4): 7–10 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/onmfyf>
11. Ryabtseva N.A., Streltsov A.A. Formation of highly productive agrocenoses of spring barley under the influence of growth regulators in the Rostov region. *Daghestan GAU Proceedings*. 2023; (1): 72–79 (in Russian). https://doi.org/10.52671/26867591_2023_1_72
12. Ryabtseva N.A. Influence of biopreparations on formation of elements of productivity of spring barley. *Agrarian science*. 2021; (11–12): 72–75 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-72-75>
13. Dolgoplova N.V., Kireev B.A. Influence of biological preparations on the yield of winter wheat Central Black Earth region. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*. 2023; (5): 29–35 (in Russian). <https://elibrary.ru/lrzeka>
14. Shalygina A.A., Tedeeva A.A. Influence of growth regulators on crop structure of winter wheat. *Agrarian science*. 2021; (4): 64–67 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-348-4-64-67>
15. Kibkalo I. Effectiveness of and Perspectives for the Sedimentation Analysis Method in Grain Quality Evaluation in Various Cereal Crops for Breeding Purposes. *Plants*. 2022; 11(13): 1640. <https://doi.org/10.3390/plants11131640>
16. Zakharova M.N., Rozhkova L.V. Effect of biological preparations on the productivity of spring barley of the Yaromir variety in the Non-Chernozem zone. *Agrarian science*. 2025; (7): 146–150 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-396-07-146-150>

ОБ АВТОРЕ

Наталья Александровна Рябцева

кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры земледелия
и технологии хранения растениеводческой продукции
rjbtseva@mail.ru
<https://orcid.org/000-0003-4121-5940>

Донской государственный аграрный университет,
ул. им. Кривошлыкова, 24, пос. Персиановский,
Октябрьский р-н, Ростовская обл., 346493, Россия

ABOUT THE AUTHOR

Natalya Aleksandrovna Ryabtseva

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
of the Department of Agriculture and Storage Technologies
for Plant Products
rjbtseva@mail.ru
<https://orcid.org/000-0003-4121-5940>

Don State Agrarian University,
24 Krivoshlykov Str., Persianovsky settlement, Oktyabrsky
district, Rostov region, 346493, Russia



СИБИРСКАЯ АГРАРНАЯ НЕДЕЛЯ

Международная агропромышленная выставка



5–7 ноября 2025

350+

компаний
принимают участие

8500+

профессиональных
посетителей

ЛИДЕРЫ РЫНКА ПРЕДСТАВЛЯЮТ

- Сельхозтехнику и оборудование.
- Технологии для растениеводства и животноводства.
- Решения для переработки, хранения и логистики.

НАЙДИТЕ СВОИХ КЛИЕНТОВ НА СИБИРСКОЙ АГРАРНОЙ НЕДЕЛЕ!

sibagroweek.ru



Место проведения :

**НОВОСИБИРСК
ЭКСПО ЦЕНТР**

Организатор:



СИБИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

+7 (383) 304-83-88

sibagroweek

@sibagroweek

РЕКЛАМА 0+



УДК 633.111.1:632.4:632.938.1

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-167-173

О.С. Кононенко ✉

Н.В. Шишкин

Е.С. Дорошенко

Аграрный научный центр «Донской»,
Ростовская обл., Зерноград, Россия

✉ olapavlenko3008@gmail.com

Поступила в редакцию: 25.06.2025

Одобрена после рецензирования: 13.09.2025

Принята к публикации: 28.09.2025

© Кононенко О.С., Шишкин Н.В.,
Дорошенко Е.С.

Оценка резистентности сортов озимой мягкой пшеницы к *Puccinia triticina* в условиях Нижнего Дона

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Использование устойчивых сортов пшеницы является эффективным, экологически и экономически выгодным методом борьбы с бурой ржавчиной. Селекция на устойчивость к болезням является альтернативой химикатам и способствует стабильному производству зерна.

Цели исследования — оценка устойчивости сортов озимой пшеницы к бурой ржавчине и выявление источников с высокой устойчивостью к возбудителю.

Методы. Изучение устойчивости сортов озимой пшеницы обыкновенной к бурой ржавчине проводили на инфекционном участке лаборатории иммунитета и защиты растений ФГБУ «АРЦ «Донской» с 2019 по 2023 год. Объектом исследования был фитопатогенный грибок *Puccinia triticina* Rob. ex Desm. f. sp. tritici Eiriss. et Henn, вызывающий бурую ржавчину. Материалом исследования послужили 98 сортов озимой пшеницы обыкновенной. Благоприятные погодные условия способствовали активному развитию болезни на листьях, что позволило получить достоверные данные об устойчивости сортов.

Результаты. Исследование показало, что преобладали сорта озимой пшеницы, устойчивые к бурой ржавчине, их процент варьировал от 80,6 (2022 г.) до 92,6 (2020 г.). В этой группе были выделены новые районированные сорта — Жаворонок, Вольный Дон, Приазовье. Устойчивые сорта играют важную роль в экологизации продукции и окружающей среды. Проанализировав динамику устойчивости изучаемых сортов за пять лет (2019–2023 гг.), было выявлено, что 81,6% (80 сортов) устойчивы к возбудителю бурой ржавчины (поражаемость этой группы сортов не превышала 15%). Выявленные в ходе исследования сорта озимой пшеницы могут быть специально использованы в селекционных программах в качестве источников устойчивости к бурой ржавчине.

Ключевые слова: озимая мягкая пшеница, бурая ржавчина, *Puccinia triticina*, устойчивость, резистентность, вирулентность

Для цитирования: Кононенко О.С., Шишкин Н.В., Дорошенко Е.С. Оценка резистентности сортов озимой мягкой пшеницы к *Puccinia triticina* в условиях Нижнего Дона. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 167–173.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-167-173>

Research article

Open access



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-167-173

Olga S. Kononenko ✉

Nikolay V. Shishkin

Ekaterina S. Doroshenko

Agricultural Research Center «Donskoy»,
Rostov region, Zernograd, Russia

✉ olapavlenko3008@gmail.com

Received by the editorial office: 25.06.2025

Accepted in revised: 13.09.2025

Accepted for publication: 28.09.2025

© Kononenko O.S., Shishkin N.V.,
Doroshenko E.S.

Estimation of winter common wheat varieties' resistance to *Puccinia triticina* in the Lower Don

ABSTRACT

Relevance. The use of resistant wheat varieties is an effective, ecologically and economically advantageous method of combating brown rust. Breeding for disease resistance is an alternative to chemicals and promotes stable grain production.

The purpose of the study is to assess the resistance of winter wheat varieties to brown rust and identify sources with high resistance to the pathogen.

Methods. The study of brown rust resistance of winter common wheat varieties was carried out at the infectious plot of the laboratory for immunity and plant protection of the FSBSI «ARC «Donskoy» from 2019 to 2023. The object of the study was the phytopathogenic fungus *Puccinia triticina* Rob. ex Desm. f. sp. tritici Eiriss. et Henn, which causes brown rust. The material of the study was 98 winter common wheat varieties. Favorable weather conditions contributed to the active development of the disease on the leaves, which made it possible to obtain reliable data on the varieties' resistance.

Results. The study has found that the winter common wheat varieties resistant to brown rust predominated, their percentage varying from 80.6 (2022) to 92.6 (2020). In this group there have been identified new zoned — Zhavoronok, Volny Don, Priazovie and others. Resistant varieties play an important role in greening products and the environment. Having analyzed the dynamics of resistance of the studied varieties over five years (2019–2023), there has been identified that 81.6% (80 varieties) are resistant to the brown rust pathogen (the damage to this set of varieties did not exceed 15%). The winter wheat varieties identified in the study can be specifically used in breeding programs as sources of brown rust resistance.

Key words: winter common wheat, brown rust, *Puccinia triticina*, tolerance, resistance, virulence

For citation: Kononenko O.S., Shishkin N.V., Doroshenko E.S. Estimation of winter common wheat varieties' resistance to *Puccinia triticina* in the Lower Don. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 167–173 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-167-173>

Введение/Introduction

Озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) — одна из основных продовольственных культур наряду с рисом и кукурузой, она обеспечивает более 80% потребности мирового населения в калориях [1, 2]. Россия занимает третье место в мире по производству пшеницы, уступая Китаю и Индии. Валовой сбор зерна в России в 2024 году, по данным Росстата, составил 82,6 млн т пшеницы¹. Ростовская область является крупнейшим «пшеничным» регионом России, она обеспечивает до 50% валового сбора производимого зерна, а в отдельные годы — до 75% [3].

Урожайность пшеницы зависит от сложного взаимодействия абиотических и биотических факторов. К последним факторам относятся болезни растений, которые представляют серьезную угрозу для производства пшеницы во многих регионах мира [4]. Среди болезней озимой мягкой пшеницы лидирующее место по распространенности и вредоносности занимает бурая (листовая) ржавчина, которая вызывается облигатным биотрофом *Puccinia triticina* Eriks [5].

Бурая ржавчина проявляется в виде оранжевых или коричневых овальных или круглых спор. По мере развития инфекции на нижней стороне листа появляются темные споры. Патоген хорошо себя чувствует при температуре от 10 до 30 °C, что способствует быстрому распространению болезни. Примерно через неделю после заражения в грибнице начинают развиваться специализированные структуры — уредоспоры. Эти структуры образуют дикариотические уредоспоры, которые придают зараженным листьям характерный ржавый вид. Это является отличительным признаком болезни [6].

Интенсивность эпифитотийного заражения пшеницы ржавчиной существенно влияет на снижение урожайности и ухудшает качество зерна, подавляя фотосинтез в зараженных листьях, особенно во флаговом листе. Это макроциклическое листовое заболевание, которое при умеренных вспышках снижает урожайность озимой пшеницы до 10%, но в то же время при эпифитотии может привести к потере урожая до 65% [7–9].

Изменения в вирулентности и агрессивности популяций патогенов в сочетании с высокой восприимчивостью сортов озимой мягкой пшеницы являются основными факторами, способствующими распространению болезни, в дополнение к благоприятным погодным условиям [10].

Фунгициды могут сдерживать заражение и распространение бурой ржавчины на посевах озимой пшеницы [11]. Однако бурая ржавчина наряду с другими патогенами может со временем постепенно выработать устойчивость к фунгицидам. Кроме того, фунгициды обладают остаточным действием, которое может негативно влиять

на окружающую среду и здоровье потребителей [12].

Использование устойчивых сортов является эффективным, экологически и экономически выгодным подходом в борьбе с бурой ржавчиной пшеницы [13, 14]. Селекция на устойчивость к болезням является альтернативой химическим методам и позволяет обеспечить стабильное производство зерна [15–18].

Ускоренная эволюция ведет к появлению новых патогенов возбудителя, что становится основным препятствием для ее реализации [19].

Ключевой стратегией в использовании резистентных к бурой ржавчине сортов выступает расширение генофонда за счет поиска источников устойчивости. Это необходимо для того, чтобы соответствовать динамике эволюции патогенов.

Цели исследования — оценка устойчивости сортов озимой мягкой пшеницы к бурой ржавчине и определение высокорезистентных источников к патогену.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Иммунологические исследования устойчивости озимой мягкой пшеницы проводили на опытных полях лаборатории иммунитета и защиты растений на базе Аграрного научного центра «Донской» в 2019–2023 гг.

Материалом исследования послужили 98 сортов озимой мягкой пшеницы, представленные российской и иностранной селекцией (табл. 1).

В качестве восприимчивого был взят сорт Тарасовская 29 (Россия), объектом исследования стал фитопатогенный гриб *Puccinia triticina* Rob. Ex Desm f. Sp. Triticis Erikss. Et Henn — возбудитель бурой ржавчины.

Посев семян озимой пшеницы на инфекционном участке проводили ручными сеялками на 2-рядковых делянках, длина которых составляла 1 п. м, норма высева семян — 60 шт / п. м в оптимальные для южной зоны Ростовской области сроки посева. Через каждые 50 делянок в питомнике высевали восприимчивый сорт.

Оценку развития заболевания листьев пшеницы проводили путем наблюдений в течение вегетационного периода — начиная с фазы выхода растений в трубку и заканчивая стадией молочно-восковой спелости.

Оценку степени поражения растений ржавчиной проводили по методике, разработанной R.F. Peterson (1948) и его коллегами в процентах, где: 0–15% — устойчивые сорта, 15–30% — среднеустойчивые, 30–40% — средневосприимчивые, более 40% — восприимчивые [20].

Математическую обработку данных осуществляли с помощью компьютерной программы Excel (США).

¹ Федеральная служба государственной статистики (дата обращения: 22.04.2025) [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/>

Таблица 1. Происхождение сортов озимой мягкой пшеницы по странам

Table 1. Origin of winter soft wheat varieties by country

№ п/п	Сорт	Страна происхождения	№ п/п	Сорт	Страна происхождения	№ п/п	Сорт	Страна происхождения
1	Танаис	Россия	34	Золотой колос	Россия	67	ХЕ-9710	Франция
2	Аксинья	Россия	35	Аюта	Россия	68	MV-09-04	Венгрия
3	Находка	Россия	36	Премьера	Россия	69	КВС-Эмиль	Германия
4	Этюд	Россия	37	Регион 161	Россия	70	Л.2940 к 3-1-3	Россия
5	Шеф	Россия	38	Аксай	Россия	71	Донская юбилейная	Россия
6	Донская степь	Россия	39	Донец	Россия	72	Монэ	Россия
7	Юбилей Дона	Россия	40	Дончак	Россия	73	КИВ-6	Россия
8	Универ	Россия	41	Зерноградка 11	Россия	74	Шестопаловка	Украина
9	Зодиак	Россия	42	Ростовчанка 5	Россия	75	Астарт	Украина
10	Раздолье	Россия	43	Ростовчанка 7	Россия	76	Slavna	Украина
11	Рубин Дона	Россия	44	Конкурент	Россия	77	MV-15-04	Венгрия
12	Ермак	Россия	45	Марафон	Россия	78	MV-37-14	Венгрия
13	Матрица	Россия	46	Саркел	Россия	79	№71 СИММУТ	Румыния
14	Приазовье	Россия	47	Селянка Донская	Россия	80	Таня	Россия
15	Разгуляй	Россия	48	Ударник	Россия	81	Статус	Россия
16	Василич	Россия	49	Барс	Россия	82	Ирда	Россия
17	Приволье	Россия	50	Флагман	Россия	83	Сиеста	Россия
18	Даша	Россия	51	Гром	Россия	84	Богема	Россия
19	Станичная	Россия	52	Юка	Россия	85	Л. 2293 к	Россия
20	Аскет	Россия	53	Лауреат	Россия	86	Л.3124 к	Россия
21	Изюминка	Россия	54	Алексейч	Россия	87	Л.2612 к 26-1	Россия
22	Лидия	Россия	55	Тимирязевка 150	Россия	88	MV-Nemere	Венгрия
23	Капризуля	Россия	56	Безостая 100	Россия	89	Памяти Шатилова	Россия
24	Лилит	Россия	57	Еланчик	Россия	90	MV Надор	Венгрия
25	Краса Дона	Россия	58	Гомер	Россия	91	Форпост	Россия
26	Вольница	Россия	59	Ахмат	Россия	92	Лео	Россия
27	Вольный Дон	Россия	60	Былина Дона	Россия	93	Александрия	Россия
28	Дон-107	Россия	61	Акапелла	Россия	94	Стиль 18	Россия
29	Жаворонок	Россия	62	Октава 15	Россия	95	Батя	Россия
30	Полина	Россия	63	Армада	Россия	96	Школа	Россия
31	Нива Дона	Россия	64	Княгиня Ольга	Россия	97	Агрофак 100	Россия
32	Амбар	Россия	65	Чорнява	Украина	98	Миг	Россия
33	Подарок Крыму	Россия	66	СО-911	Франция			

Погодные условия в изучаемые годы были благоприятными для развития бурой ржавчины на листьях озимой пшеницы, что в свою очередь способствовало получению достоверных оценок по устойчивости². Весна 2019 года характеризовалась недостатком осадков в марте, апреле и мае, высокими температурами и низкой влажностью, что вызвало длительную засуху. Эти условия негативно повлияли не только на озимые культуры, но и на проявление листовых болезней пшеницы. При низкой влажности и высоких температурах ночью роса не образуется. Это способствовало снижению проникновения спор болезней в листовую поверхность.

Весна 2020 года была теплой, но сухой: осадков выпало на 32,9 мм меньше нормы. В марте осадков не было, в апреле — 24,5 мм, в мае — 79,9 мм. Среднесуточная температура составляла 10,7 °С. Лето было сухим и жарким, в июне осадков выпало 38,8 мм при норме 71,3 мм.

В питомнике в условиях искусственного заражения бурой ржавчиной на делянках патоген развивался хорошо, но в июне из-за жары его развитие приостановилось.

Осадки в марте, апреле и в отдельные декады мая и июня 2021 года превышали средние многолетние показатели в 2–3 раза, температурный режим был выше многолетних показателей. На посевах зерновых культур создались благоприятные условия для развития листовых болезней.

Весна 2022 года характеризовалась температурой в пределах нормы и обильными осадками, особенно в марте (67,4 мм при норме 37,0 мм). В марте среднесуточная температура воздуха была 1,5 °С, в апреле — 12,6 °С (на 1,9 °С выше нормы), в мае — ниже нормы, но осадков было достаточно. Лето было жарким, особенно июнь (23,2 °С — на 2,7 °С выше нормы). Метеоусловия мая и июня способствовали развитию болезней на посевах пшеницы.

² <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34735.htm>

Весна 2023 года характеризовалась повышенным температурным режимом в марте и апреле (+5,4 °C и +0,8 °C к среднемуголетней соответственно). Май был в пределах многолетних значений. Апрель и май характеризовались обильными осадками (+45,3 мм и +64,7 мм). Эти условия ускорили развитие ржавчины на озимых культурах, что и наблюдали авторы в опытах. Метеоусловия июня способствовали дальнейшему развитию листовых болезней на посевах пшеницы.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В результате многолетних полевых исследований, направленных на изучение устойчивости сортов пшеницы к *Puccinia triticina*, было выявлено преобладание сортов, относящихся к устойчивой группе, с уровнем поражения не более 15%. В 2019 году доля таких сортов составила 87,7% (86 шт.), в 2020-м — 92,9% (91 шт.), в 2021-м — 82,6% (81 шт.), в 2022-м — 80,6% (79 шт.), а в 2023 году — 87,7% (86 шт.) (рис. 1).

В устойчивой группе были выделены новые районированные сорта (Жаворонок, Вольный Дон, Гомер, Ахмат (внесены в Госреестр в 2020 г.), Раздолье (внесен в Госреестр в 2023 г.), Приазовье (внесен в Госреестр в 2024 г.), представленные в таблице 2.

Вирулентность к бурой ржавчине в 2019 году проявили 6 сортов: Тарасовская 29, Юка (поражение 80–100%), Амбар, Княгиня Ольга, СО 911, MV-09-04 (поражение 50–60%), Капризуля (поражение 40–50%). Наибольшее количество восприимчивых сортов (Юка, Былина Дона, Октава 15, Амбар и др.) было отмечено в 2021 году — 11,2%, минимальный процент (2%) вирулентных сортов был отмечен в 2020 году.

Устойчивые сорта растений помогают снизить использование пестицидов в сельском хозяйстве, что способствует экологизации продукции и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду.

Проанализировав устойчивость изучаемых сортов, за пять лет (2019–2023 гг.), было установлено (рис. 2), что 81,6% (80 сортов) обладают резистентностью к патогену бурой ржавчины (поражение данной выборки сортов не превышало 15%), из них 70 сортов принадлежат российской селекции: 43 сорта (Зодиак, Раздолье, Рубин Дона, Подарок Крыму, Премьера, Приазовье и др.) из ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», 23 сорта (Лео, Стил 18, Школа, Агрофак 100, Миг, Монэ и др.) из ФГБНУ «Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко», 2 сорта (Акапелла, Богема) из Федерального Ростовского аграрного научного центра, 2 сорта (Армада, Сиеста) из ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный

Рис. 1. Количественное распределение сортов по устойчивости к бурой ржавчине (2019–2023 гг.)

Fig. 1. Quantitative distribution of the varieties according to brown rust resistance (2019–2023)



У – устойчивые, СУ – среднеустойчивые, СВ – средневосприимчивые, В – восприимчивые

Таблица 2. Оценка новых районированных сортов по устойчивости к бурой ржавчине, инфекционный фон (2019–2023 гг.), %

Table 2. Assessment of new zoned varieties for resistance to brown rust, infection background (2019–2023), %

Сорт	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Жаворонок	01*	01	01	01	01
Вольный Дон	01	01	01	0-5	01
Гомер	10	01	01	01	01
Ахмат	01	01	01	01	01
Раздолье	10	01	01	01	01
Приазовье	5	01	5	5	01
Ффакт	0,35	3,58	2,07	1,29	3,58
F ₀₅	4,53				

Примечание: * 01 — единичные пустулы.

Рис. 2. Распределение сортов озимой мягкой пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине (2019–2023 гг.)

Fig. 2. Distribution of winter common wheat varieties according to brown rust resistance (2019–2023)



центр»; 10 сортов из зарубежных стран: 4 сорта (MV-15-04, MV-37-14, MV-Nemere, MV-Nador) из Венгрии, 4 сорта (Чорнява, Астарт, Шестопаловка, Slavna) с Украины, 1 сорт (КВС-Эмиль) из Германии, 1 сорт (№ 71 SIMMYT) из Румынии.

В среднеустойчивой (поражение 15–30%) и восприимчивой (поражение более 40%) группах

были выделены по 8 сортов (8,2%). В первую группу вошли сорта Универ, Василич, Вольница, Донец, Статус, Батя (Россия), СО 911 и ХЕ-9710 (Франция); во вторую — Дон 107, Амбар, Юка, Октава 15 (Россия) и др. В средневосприимчивой группе отмечены всего 2% — сорта Лилит и MV-09-04 (табл. 3).

Таблица 3. Оценка сортов озимой мягкой пшеницы на устойчивость к северокавказской популяции *Puccinia triticina*, инфекционный фон (2019–2023 гг.), %

Table 3. Assessment of winter soft wheat varieties for resistance to the North Caucasian population of *Puccinia triticina*, infection background (2019–2023), %

Сорт	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Универ	30	10	15	20	10
Василич	20	20	15	30	15
Вольница	10	01*	40	20	15
Донец	5	15	50	30	15
Статус	01	20	40	30	15
Батя	20	20	20	15	01
СО 911	60	5	15	20	20
ХЕ 9710	40	01	5	30	20
Дон 107	40	15	80	100	60
Амбар	60	100	100	100	100
Юка	100	100	100	100	100
Октава 15	5	5	80	50	30
Лилит	40	01	60	40	30
MV-09-04	60	40	80	40	10
Ффакт	1,31	0,92	0,92	1,05	1,00
F ₀₅	2,24				

Примечание: * 01 — единичные пустулы.

Таблица 3. Оценка высокорезистентных сортов озимой пшеницы к бурой ржавчине, инфекционный фон (2019–2023 гг.), %

Table 3. Evaluation of highly resistant winter wheat varieties to brown rust, infection background (2019–2023), %

Сорт	Происхождение	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Армада	Россия	01*	01	01	01	01
Аюта	Россия	01	01	0–5**	01	01
Зодиак	Россия	0–5	01	0–5	01	01
КВС-Эмиль	Германия	01	01	01	01	01
Матрица	Россия	01	01	01	0–5	01
Монэ	Россия	01	01	01	01	01
Находка	Россия	01	01	01	0–5	01
Полина	Россия	01	0–5	01	01	01
Премьера	Россия	01	01	01	0–5	01
Приволье	Россия	01	01	01	01	01
Сиеста	Россия	01	01	01	01	01
Ударник	Россия	01	01	01	01	01
Флагман	Россия	01	01	01	0–5	01
Чорнява	Украина	0–5	0–5	01	0–5	01
Этюд	Россия	01	0–5	01	01	01
Slavna	Украина	01	0–5	01	01	01
№ 71 Cimmyt	Румыния	01	01	0–5	0–5	0–5
Тарасовская 29 (восприимчивый)	Россия	80–100	80–100	100	80–100	100

Примечание: * 01 — единичные пустулы; ** 0–5 — количество пустул на листе не превышало 8 шт.

Таким образом, исходя из полученных данных, составлена таблица 4, в которой представлены высокорезистентные к бурой ржавчине сорта озимой мягкой пшеницы. Поражение листовой пластины данных сортов не превышало 5%, и по годам исследования они сохраняли высокую авирулентность к Северо-Кавказской популяции *Puccinia triticina*.

Для успешной селекции устойчивых к бурой ржавчине сортов озимой мягкой пшеницы целесообразно привлекать в скрещивание как местные сорта (Приазовье, Ударник, Флагман и др.), сохраняющие длительную высокую резистентность к возбудителю болезни, так и сорта инорайонной (Армада, Ахмат, Монэ и др.) и зарубежной (КВС-Эмиль, Slavna, № 71 Simmyt и др.) селекции, проявляющие авирулентность к патогену в конкретных природно-климатических зонах.

Приведенные в таблице 4 сорта на протяжении пяти лет изучения на инфекционном фоне сохраняют высокую устойчивость к местной популяции бурой ржавчины на юге России. Сорта, обладающие высокой резистентностью к патогену, способствуют стабилизации фитосанитарной обстановки в агроценозах, улучшению экологической среды и рекомендуются для технологий производства экологически чистой продукции, а также как источники устойчивости к бурой ржавчине.

Выводы/Conclusions

Многолетние исследования устойчивости различных генотипов озимой пшеницы к патогену *Puccinia triticina*, вызывающему бурую ржавчину, продемонстрировали высокую резистентность большинства проанализированных сортов (Вольный Дон, Жаворонок, Премьера, Приазовье, Раздолье, Школа и др.). Процент устойчивых генотипов варьировался в диапазоне от 80,6 в 2022 году до 92,9 в 2020-м. В среднем за исследуемый период устойчивость к бурой ржавчине была характерна для 80 сортов, что составило 81,6% от общей выборки. Уровень поражения листовой поверхности у данных сортов не превышал 15%.

В результате проведенных исследований были идентифицированы генотипы, обладающие высокой устойчивостью к патогену и представляющие интерес для селекционных программ. К ним относятся сорта Армада, Ахмат, Матрица, Премьера, Приазовье, Приволье, Ударник и др. Эти генотипы могут быть использованы в качестве исходного материала для создания новых сортов озимой пшеницы с повышенной устойчивостью к бурой ржавчине, что позволит значительно снизить риски потерь урожая и повысить экономическую эффективность сельскохозяйственного производства.

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 в рамках государственного задания Минобрнауки России № 0706-2019-0003 и № 0505-2022-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Riaz M., Wong Y. Estimation of Yield Losses due to Leaf Rust and Late Seeding on Wheat (*Triticum aestivum* L) Variety Seher-06 in District Faisalabad, Punjab, Pakistan. *Advances in Biotechnology & Microbiology*. 2017; 5(2): 555657. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.05.555657>
- Raj N. et al. Rapid transfer of the leaf rust resistance gene *Lr52* for the improvement of bread wheat cultivar HD3086. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2024; 134: 102447. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102447>
- 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>
- Prasad P., Savadi S., Bhardwaj S.C., Gupta P.K. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020; 124(6): 537–550. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.02.013>
- Bolton M.D., Kolmer J.A., Garvin D.F. Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology*. 2008; 9(5): 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x>
- Kolmer J.A. Tracking wheat rust on a continental scale. *Current Opinion in Plant Biology*. 2005; 8(4): 441–449. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2005.05.001>
- Khan M.H., Bukhari A., Dar Z.A., Rizvi S.M. Status and strategies in breeding for rust resistance in wheat. *Agricultural Sciences*. 2013; 4(6): 292–301. <http://doi.org/10.4236/as.2013.46042>
- Манукян И.Р., Догузова Н.Н. Селекция озимой мягкой пшеницы на устойчивость к бурой ржавчине. *Аграрный научный журнал*. 2022; (9): 38–42. <http://doi.org/10.28983/asj.y2022i9pp38-42>
- Рубец В.С., Лаппо А.А., Пыльнев В.В., Ворончихина И.Н., Ворончихин В.В. Селекция мягкой пшеницы на устойчивость к бурой ржавчине в Российской Федерации. *Кормопроизводство*. 2023; (7): 32–43. <https://elibrary.ru/nsujlh>
- Sheng D. et al. Characterization of leaf rust resistance in a set of wheat-*Thinopyrum* amphiploid-derived hexaploid breeding lines. *Crop Protection*. 2022; 156: 105956. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.105956>
- Luo X.Y. Residues from pesticides and countermeasures. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2009; 25(18): 344–347.
- Kaur H. et al. Postulation of leaf rust resistance genes in Indian and exotic wheat germplasm using near-isogenic lines (NILs) and molecular markers. *Crop Protection*. 2023; 174: 106431. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106431>
- Pink D.A.C. Strategies using genes for non-durable disease resistance. *Euphytica*. 2002; 124(2): 227–236. <https://doi.org/10.1023/A:1015638718242>
- El-Orabey W.M. Virulence of some *Puccinia triticina* races to the effective wheat leaf rust resistant genes *Lr 9* and *Lr 19* under Egyptian field conditions. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2018; 102: 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.12.006>
- Бражицкая П.А. Селекция растений на устойчивость к болезням. Виртуозы науки. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых за 2023 г. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 48–50. <https://elibrary.ru/dxxttp>
- Малькова В.С., Былевская А.Ю. Селекция растений на устойчивость. Актуальные вопросы современной селекции, биотехнологии и ботаники. Сборник докладов Всероссийской студенческой научно-практической конференции. М.: Российский государственный аграрный университет. 2024; 350–354. <https://elibrary.ru/cazxbq>
- Керимов Р.В., Тархов А.С., Аблова И.Б. Изучение зерновых колосовых культур по устойчивости к вирусным болезням. Генетический потенциал сельскохозяйственных растений и его реализация в селекции, семеноводстве и размножении. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции Кубанского отделения ВОГиС. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина. 2024; 82–84. <https://elibrary.ru/avzlbz>

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 current study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 0706-2019-0003 and No. 0505-2022-0003.

REFERENCES

- Riaz M., Wong Y. Estimation of Yield Losses due to Leaf Rust and Late Seeding on Wheat (*Triticum aestivum* L) Variety Seher-06 in District Faisalabad, Punjab, Pakistan. *Advances in Biotechnology & Microbiology*. 2017; 5(2): 555657. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.05.555657>
- Raj N. et al. Rapid transfer of the leaf rust resistance gene *Lr52* for the improvement of bread wheat cultivar HD3086. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2024; 134: 102447. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102447>
- 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>
- Prasad P., Savadi S., Bhardwaj S.C., Gupta P.K. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020; 124(6): 537–550. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.02.013>
- Bolton M.D., Kolmer J.A., Garvin D.F. Wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Molecular Plant Pathology*. 2008; 9(5): 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x>
- Kolmer J.A. Tracking wheat rust on a continental scale. *Current Opinion in Plant Biology*. 2005; 8(4): 441–449. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2005.05.001>
- Khan M.H., Bukhari A., Dar Z.A., Rizvi S.M. Status and strategies in breeding for rust resistance in wheat. *Agricultural Sciences*. 2013; 4(6): 292–301. <http://doi.org/10.4236/as.2013.46042>
- Manukyan I.R., Doguzova N.N. Selection of winter soft wheat for resistance to brown rust. *Agrarian Scientific Journal*. 2022; (9): 38–42 (In Russian). <http://doi.org/10.28983/asj.y2022i9pp38-42>
- Rubets V.S., Lappo A.A., Pylnev V.V., Voronchikhina I.N., Voronchikhin V.V. Breeding of common wheat resistant to brown rust in the Russian Federation. *Kormoproizvodstvo*. 2023; (7): 32–43 (In Russian). <https://elibrary.ru/nsujlh>
- Sheng D. et al. Characterization of leaf rust resistance in a set of wheat-*Thinopyrum* amphiploid-derived hexaploid breeding lines. *Crop Protection*. 2022; 156: 105956. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.105956>
- Luo X.Y. Residues from pesticides and countermeasures. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2009; 25(18): 344–347.
- Kaur H. et al. Postulation of leaf rust resistance genes in Indian and exotic wheat germplasm using near-isogenic lines (NILs) and molecular markers. *Crop Protection*. 2023; 174: 106431. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106431>
- Pink D.A.C. Strategies using genes for non-durable disease resistance. *Euphytica*. 2002; 124(2): 227–236. <https://doi.org/10.1023/A:1015638718242>
- El-Orabey W.M. Virulence of some *Puccinia triticina* races to the effective wheat leaf rust resistant genes *Lr 9* and *Lr 19* under Egyptian field conditions. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2018; 102: 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.12.006>
- Brazhitskaya P.A. Plant breeding for disease resistance. *Virtuosos of science. Collection of abstracts of the International scientific and practical conference of students and young scientists for 2023*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 48–50 (In Russian). <https://elibrary.ru/dxxttp>
- Malkova V.S., Bylevskaya A.Yu. Plant breeding for resistance. *Actual issues of modern breeding, biotechnology and botany. Collection of reports of the All-Russian student scientific and practical conference*. Moscow: Russian State Agrarian University. 2024; 350–354 (In Russian). <https://elibrary.ru/cazxbq>
- Kerimov R.V., Tarkhov A.S., Ablova I.B. Study of grain crops for resistance to viral diseases. *Genetic potential of agricultural plants and its implementation in breeding, seed production and reproduction. Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference of the Kuban branch of the Vavilov Society of Geneticists and Breeders*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2024; 82–84 (In Russian). <https://elibrary.ru/avzlbz>

18. Афанасенко О.С. Современные достижения генетики устойчивости зерновых культур к возбудителям болезней и проблемы их использования в селекции. *V Всероссийский конгресс по защите растений. Сборник тезисов докладов, посвященный 300-летию Российской академии наук.* СПб.: Всероссийский институт защиты растений. 2024; 26. <https://elibrary.ru/dpwptd>

19. Bhardwaj S.C. *et al.* Physiologic Specialization and Genetic Differentiation of *Puccinia triticina* Causing Leaf Rust of Wheat on the Indian Subcontinent During 2016 to 2019. *Plant Disease*. 2021; 105(7): 1992–2000. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1382-RE>

20. Peterson R.F., Cambell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canadian Journal of Research*. 1948; 26(5): 496–500. <https://doi.org/10.1139/cjr48c-033>

18. Afanasenko O.S. Modern achievements in the genetics of resistance of grain crops to pathogens and problems of their use in breeding. *V All-Russian Congress on Plant Protection. A collection of abstracts dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences.* St. Petersburg: All-Russian Institute for Plant Protection. 2024; 26 (In Russian). <https://elibrary.ru/dpwptd>

19. Bhardwaj S.C. *et al.* Physiologic Specialization and Genetic Differentiation of *Puccinia triticina* Causing Leaf Rust of Wheat on the Indian Subcontinent During 2016 to 2019. *Plant Disease*. 2021; 105(7): 1992–2000. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1382-RE>

20. Peterson R.F., Cambell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canadian Journal of Research*. 1948; 26(5): 496–500. <https://doi.org/10.1139/cjr48c-033>

ОБ АВТОРАХ

Ольга Сергеевна Кононенко

агроном
olapavlenko3008@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7012-6440>

Николай Васильевич Шишкин

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник
nik.shishkin.1961@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3863-0297>

Екатерина Сергеевна Дорошенко

младший научный сотрудник
katyalevchenko1@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6015-5616>

Аграрный научный центр «Донской», ул. Научный городок, 3, Зерноград, 347740, Ростовская обл., Россия

ABOUT THE AUTHORS

Olga Sergeevna Kononenko

Agronomist
olapavlenko3008@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7012-6440>

Nikolay Vasilievich Shishkin

Candidate of Agricultural Sciences,
Leading Researcher
nik.shishkin.1961@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3863-0297>

Ekaterina Sergeevna Doroshenko

Junior Researcher
katyalevchenko1@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6015-5616>

Agricultural Research Center “Donskoy”, 3 Nauchny Gorodok, Zernograd, Rostov region, 347740, Russia

ПРО ЯБЛОКО

ЗДЕСЬ ФОРМИРУЕТСЯ БУДУЩЕЕ
РОССИЙСКОГО САДОВОДСТВА

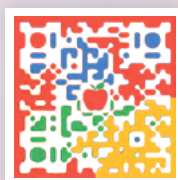
9-11 июня 2026

МВЦ «МинводыЭКСПО»

ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПОДРОБНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ
О ВЫСТАВКЕ >



УДК 631.171

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-174-181

Ф.Е. Владимиров

А.Р. Хахимов ✉

С.С. Юрочка

Д.Ю. Павкин

С.О. Базаев

Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ,
Москва, Россия

✉ arty.hv@gmail.com

Поступила в редакцию: 19.05.2025

Одобрена после рецензирования: 13.09.2025

Принята к публикации: 28.09.2025

© Владимиров Ф.Е., Хахимов А.Р.,
Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Базаев С.О.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-174-181

Fedor E. Vladimirov

Artyom R. Khakimov ✉

Sergey S. Yurochka

Dmitry Yu. Pavkin

Savr O. Bazaev

Federal Scientific Agroengineering
Center VIM, Moscow, Russia

✉ arty.hv@gmail.com

Received by the editorial office: 19.05.2025

Accepted in revised: 13.09.2025

Accepted for publication: 28.09.2025

© Vladimirov F.E., Khakimov A.R.,
Yurochka S.S., Pavkin D.Yu., Bazaev S.O.

Оценка эффективности мониторинга pH и руминации при контроле кормления коров

РЕЗЮМЕ

В исследовании сравниваются две технологии точного животноводства — ошейник SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль) и рубцовый болюс «Агробиотест» (ООО «Агробиотест», Россия) — для мониторинга физиологического состояния молочных коров. Эксперимент проводили на 10 коровах голштинской породы на базе фермы КубГАУ. Рубцовый болюс продемонстрировал высокую точность (97,8%) в измерении pH рубца, что критически важно для оценки кислотности и здоровья ЖКТ. Ошейник SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль) оказался более эффективным для отслеживания руминации (89,4%), что позволяет контролировать пищевое поведение. Комбинированное использование устройств повысило общую точность диагностики метаболического статуса коров до 98,5%, обеспечивая более полную картину состояния животных. Выявлена умеренная корреляция ($r = 0,73$) между активностью руминации и уровнем pH, что подтверждает взаимосвязь пищевого поведения и метаболических процессов. Исследование подтверждает, что интеграция данных от разных сенсоров (ошейников и болюсов) позволяет повысить эффективность ранней диагностики метаболических нарушений и оптимизировать рационы. Полученные результаты открывают перспективы для создания цифровых двойников животных, что способствует развитию точного животноводства.

Ключевые слова: молочные коровы, акселерометры, болюсы, ошейники для мониторинга, цифровое животноводство, классификация поведения

Для цитирования: Владимиров Ф.Е., Хахимов А.Р., Юрочка С.С., Павкин Д.Ю., Базаев С.О. Мониторинг pH и руминации для оптимизации кормления молочных коров: сравнительный анализ болюсов и ошейников с акселерометрами. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 174–181.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-174-181>

Evaluation of the effectiveness of pH and rumination monitoring in cow feeding control

ABSTRACT

The study compares two technologies of precision animal husbandry — the SCR Heatime collar (Allflex Livestock Intelligence, Israel) and the “Agrobiotest” bolus (“Agrobiotest” LLC, Russia) — for monitoring the physiological state of dairy cows. The experiment was conducted on 10 Holstein cows at the KubSAU farm. The cicatricial bolus demonstrated high accuracy (97.8%) in measuring the pH of the scar, which is critically important for assessing the acidity and health of the gastrointestinal tract. The SCR Heatime collar (Allflex Livestock Intelligence, Israel) proved to be more effective for tracking rumination (89.4%), which allows monitoring eating behavior. The combined use of the devices increased the overall accuracy of diagnosing the metabolic status of cows to 98.5%, providing a more complete picture of the animals' condition. A moderate correlation ($r = 0.73$) was found between the rumination activity and the pH level, which confirms the relationship between eating behavior and metabolic processes. The study confirms that the integration of data from different sensors (collars and boluses) makes it possible to increase the effectiveness of early diagnosis of metabolic disorders and optimize diets. The results obtained open up prospects for the creation of digital animal twins, which contributes to the development of precision animal husbandry.

Key words: dairy cows, accelerometers, boluses, monitoring collars, digital animal husbandry, behavior classification

For citation: Vladimirov F.E., Khakimov A.R., Yurochka S.S., Pavkin D.Yu., Bazaev S.O. Comparison of boluses and collars with accelerometers for monitoring the activity of dairy cows. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 174–181 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-174-181>

Введение/Introduction

Современное молочное животноводство активно использует технологии точного животноводства (Precision Livestock Farming, PLF) для повышения продуктивности, оптимизации управления стадом и минимизации экономических и экологических затрат [1]. PLF включает автоматизированные системы мониторинга, которые собирают данные о физиологических и поведенческих параметрах животных в реальном времени, обеспечивая раннюю диагностику нарушений и корректировку производственных процессов [2].

Современный агропромышленный комплекс России обладает значительными резервами для повышения эффективности сельскохозяйственного производства [3–7]. Для реализации этого потенциала необходима системная модернизация технологической базы, предполагающая внедрение автоматизированных систем управления производственными процессами, цифровых платформ для мониторинга и анализа данных, интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе методов искусственного интеллекта [8].

Как показывают исследования, наблюдаемая трансформация АПК сопровождается последовательной цифровизацией основных производственных процессов и внедрением интеллектуальных систем поддержки принятия решений [9–12].

Одним из ключевых аспектов является контроль кормления и рационов, напрямую влияющих на здоровье рубца, продуктивность и общее благополучие коров [13–16].

Нарушения кислотно-щелочного баланса рубца, такие как субклинический ацидоз рубца (далее — СКАР), вызванные несбалансированными рационами с высоким содержанием концентратов, могут снижать надой и повышать риск метаболических заболеваний [17].

Для мониторинга состояния коров применяются различные устройства. Ошейники, такие как SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль), оснащенные трехосевыми акселерометрами, эффективно отслеживают руминацию и двигательную активность [18]. Данные о времени и интенсивности руминации коррелируют с потреблением сухого вещества и качеством корма, что позволяет оптимизировать состав рационов и выявлять отклонения в поведении [2]. Рубцовые болюсы (например, «Агробiotест», Россия) измеряют pH, температуру и моторику рубца, предоставляя уникальную информацию о состоянии пищеварительной системы. К примеру, снижение pH ниже 5,8 указывает на риск СКАР, что требует немедленной корректировки рациона [17]. В отличие от ошейников, болюсы обеспечивают прямой мониторинг внутренней среды, что делает их незаменимыми для диагностики метаболических нарушений [19].

Несмотря на широкое применение этих технологий, их сравнительная эффективность и

потенциал интеграции остаются недостаточно изученными. Ошейники и болюсы имеют разные принципы действия и точки приложения: первые фокусируются на внешнем поведении, вторые — на физиологических процессах [20].

Комбинированный подход, объединяющий данные руминации и pH, может повысить точность диагностики и способствовать созданию цифровых двойников — виртуальных моделей животных, интегрирующих многопараметрические данные для прогнозирования здоровья и продуктивности [21]. Такие модели, основанные на алгоритмах машинного обучения, позволяют фермерам принимать обоснованные решения, минимизируя риски и повышая эффективность производства.

Цифровые двойники животных представляют собой динамические модели, которые обновляются в реальном времени на основе данных от систем мониторинга, таких как ошейники и болюсы [22]. Эти устройства собирают информацию о руминации, pH рубца, температуре и двигательной активности, создавая основу для построения виртуальных копий [23]. Например, данные о снижении pH ниже 5,8, зафиксированные болюсом, могут быть использованы для моделирования риска СКАР, а информация о руминации от ошейника помогает прогнозировать потребление корма и корректировать рационы. Интеграция этих данных через машинное обучение позволяет создавать точные цифровые копии, которые отражают физиологическое состояние животного, предсказывают потенциальные проблемы и предлагают оптимальные решения для управления стадом [21].

Такой подход открывает новые возможности для автоматизации и повышения эффективности молочного производства.

Цели исследования — оценка эффективности ошейников и рубцовых болюсов в контроле кормления, изучение корреляции между руминацией и pH, а также разработка рекомендаций по интеграции данных для управления стадом.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент проводили на 10 коровах голштинской породы (1–2-й лактации, средняя продуктивность 32 кг/день) с декабря 2024 г. по март 2025 г. на животноводческой ферме Кубанского государственного аграрного университета (КубГАУ, Краснодарский край, Россия).

Все коровы имели одинаковый физиологический статус, содержались в одной группе и получали унифицированный рацион, сбалансированный по питательным веществам для лактирующих коров, чтобы минимизировать вариативность условий. Все процедуры, связанные с использованием животных в исследовании, были одобрены Этической комиссией Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Россия).

Исследование проводили в соответствии с международными нормами и руководящими принципами обращения с сельскохозяйственными животными¹.

Для оценки влияния разных типов рационов применяли: 1) высококонцентрированный рацион (60% концентратов); 2) высоковолокнистый рацион (30% концентратов) и 3) базовый (контрольный) рацион (40% концентратов).

Каждая корова была оснащена ошейником SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль) с трехосевым акселерометром (частота дискретизации 10 Гц, RFID 134,2 кГц, беспроводная связь 2,4 ГГц) для регистрации движений головы и рубцовым болюсом «Агробiotест» (ООО «Агробiotест», Россия) с трехосевым акселерометром, датчиками температуры и pH (частота сбора данных 10 Гц, передача данных на 868 МГц) для мониторинга жвачки и моторики рубца.

Для оснащения животных ошейники надевали на шею (рис. 1а) с учетом комфорта коров, а болюсы вводили в рубец (рис. 1б) с помощью специального аппликатора под ветеринарным контролем.

Болюсы «Агробiotест» калибровались перед установкой с использованием буферных растворов pH 4,0 и 7,0 (рис. 2а), а также эталонного термометра для температуры. Для проверки точности измерения pH использовали эталонный pH-метр OHAUS Aquasearcher AB23PH-F, Ohaus Corp., США (рис. 2б).

Погрешность измерения pH составляет $\pm 0,2$ до 90 дней эксплуатации и $\pm 0,4$ до 150 дней эксплуатации. Ошейники SCR Heatime не требовали дополнительной калибровки в ходе эксперимента, так как их акселерометр калибруется производителем. Конструкция болюса разработана таким образом, чтобы предотвратить засорение датчика pH кормовыми массами в желудке, обеспечивая высокую точность измерений.

Эталонные данные с ошейников, а также данные с болюсов собирали непрерывно, синхронизировали по временным меткам с учетом часовых интервалов. Поведение животных (руминацию, кормление, отдых) наблюдал персонал в течение 10 часов ежедневно (с 08:00 до 18:00) на протяжении 120 дней для создания эталонного набора данных, что соответствует сервис-периоду. После того как устройства были установлены, данные с них передавали на локальный сервер фермы, где происходила предварительная обработка данных:

Рис. 1. Установка ошейников и имплантация болюсов

Fig. 1. Installation of collars and implantation of boluses

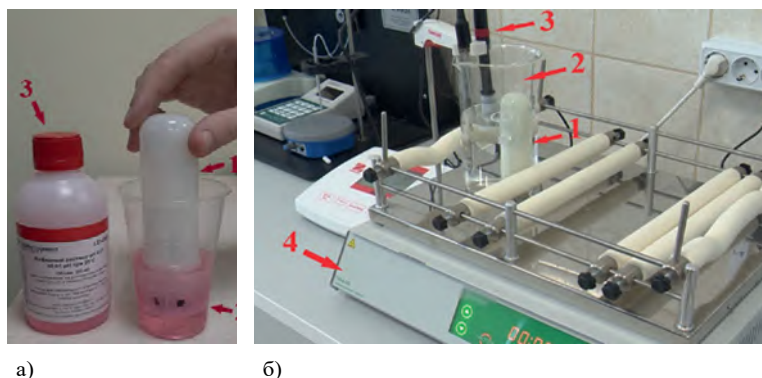


а) установка ошейников
б) имплантация болюса

a) installation of collars
b) bolus implantation

Рис. 2. Оборудование для проверки точности измерения датчиков pH и температуры: а) калибровка pH метра: 1 — болюс, 2 — пластиковая тара, 3 — калибровочный раствор; б) процесс исследования: 1 — болюс, 2 — измерительный шейкер «ЭКРОС-6410»

Fig. 2. Equipment for verifying the accuracy of pH and temperature sensors: а) pH meter calibration: 1 — bolus, 2 — plastic container, 3 — calibration solution; б) testing process: 1 — bolus; 2 — measuring shaker «EKROS-6410»



а)

б)

синхронизация временных меток, фильтрация шумов и сегментация сигналов. Болюсы «ООО «Агробiotест» поддерживают автоматическую синхронизацию с программами управления стадом других производителей.

Для анализа применяли классификатор «случайного леса» (библиотека scikit-learn, Python) с расчетом метрик точности, прецизионности, полноты и F1-оценки с 10-кратной перекрестной проверкой.

Выбросы в данных обрабатывались на этапе предварительной обработки — фильтрация с использованием медианного фильтра и удаление значений за пределами 3σ от среднего. Это затронуло менее 5% данных, обеспечивая чистоту набора для анализа.

Корреляцию между руминацией и pH оценивали с помощью коэффициента Пирсона, статистическую значимость различий определяли парным t-тестом с уровнем значимости $p < 0,05$.

Точность классификации рассчитывалась как:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

где TP — истинно положительные, TN — истинно отрицательные, FP — ложно положительные, FN — ложно отрицательные предсказания.

¹ Директива от 22.09.2010 № 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях.

F1-оценка определялась как:

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}},$$

где $\text{Precision} = TP / (TP + FP)$,
 $\text{Recall} = TP / (TP + FN)$.

Статистические различия между устройствами оценивали с помощью парного t-теста ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Для оценки согласованности между колебаниями значений руминации и pH коров были сравнены их колебания в двухчасовых диапазонах. Выявили, что во временном диапазоне от 8:00 до 14:00 у животных стабильно повышается pH. Одновременно с этим наблюдаются наибольшие колебания значений руминации. Во временном диапазоне с 16:00 по 20:00 наблюдается одновременное снижение pH и руминации животных.

Графическое изображение результатов представлено на рисунке 3.

Болюс «Агробиотест» (ООО «Агробиотест», Россия) продемонстрировал высокую точность в мониторинге pH рубца (97,8%), тогда как ошейник SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль) показал точность 89,4% для оценки руминации, как показано в таблице 1.

Комбинированный подход, интегрирующий данные обоих устройств, повысил общую точность диагностики метаболического статуса коров (в частности, выявления риска СКАР) до 98,5%, подтверждая их взаимодополняющий характер.

Анализ данных показал, что среднее время руминации составило 445,5 мин/день, а средний pH рубца — 6,14 (табл. 2).

Эпизоды снижения pH ниже 5,8, указывающие на риск СКАР, наблюдали при высококонцентратном рационе (60% концентратов), снижая pH до 5,7 и руминацию до 420 мин/день, тогда как высоковолокнистый рацион (30% концентратов) повышал pH до 6,4 и руминацию до 480 мин/день (табл. 3).

Динамика pH и руминации за сутки представлена на рисунке 4, где видно, что снижение pH ниже 6,0 часто совпадало с уменьшением руминации (< 20 мин/час), особенно после кормления кормосмесью с высоким содержанием концентратов.

Сопоставление данных проводили для 10 коров, выбирая значения pH от болюса за каждый час (например, 08:00, 09:00) и соответствующие значения руминации от ошейника за тот же час. Пример: для коровы 1 в 08:00 pH составил 6,2, руминация — 30 мин/час; в 12:00 pH снизился до 5,8, руминация — 10 мин/час. Коэффициент

Рис. 3. Сравнение динамики между колебаниями значений руминации и pH коров

Fig. 3. Comparison of dynamics between fluctuations in rumination and pH values of cows

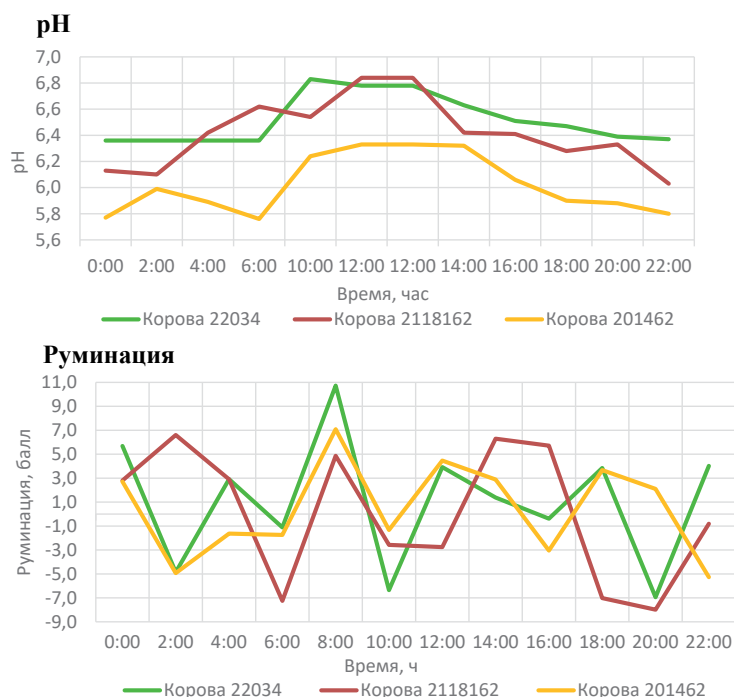


Таблица 1. Сравнение точности мониторинга руминации ошейником SCR Heatime и болюсом «Агробиотест»
Table 1. Comparison of the accuracy of rumination monitoring with the SCR Heatime collar and the «Agrobiotest» bolus

Метрика	Ошейник SCR Heatime, %	Болюс «Агробиотест», %	Комбинированный подход, %
Точность	89,4	97,8	98,5
Прецизионность	88,0	96,5	97,2
Полнота	90,2	98,0	98,8
F1-оценка	89,1	97,2	98,0

Примечание: данные основаны на анализе классификатора случайного леса с 10-кратной перекрестной проверкой.

Таблица 2. Усредненные данные руминации и pH
Table 2. Average rumination and pH data

Корова	Среднее время руминации, мин/день	Средний pH рубца	Коэффициент корреляции Пирсона
1	450	6,2	0,75
2	430	6,0	0,68
3	460	6,3	0,80
4	440	6,1	0,72
5	455	6,2	0,78
6	425	5,9	0,65
7	465	6,4	0,82
8	435	6,0	0,70
9	450	6,2	0,76
10	445	6,1	0,73
Среднее	445,5	6,14	0,74

Примечание: данные руминации и pH усреднены по часовым интервалам. Корреляция рассчитана для каждого животного с учетом синхронизированных временных меток.

Таблица 3. Влияние рационов на pH и руминацию

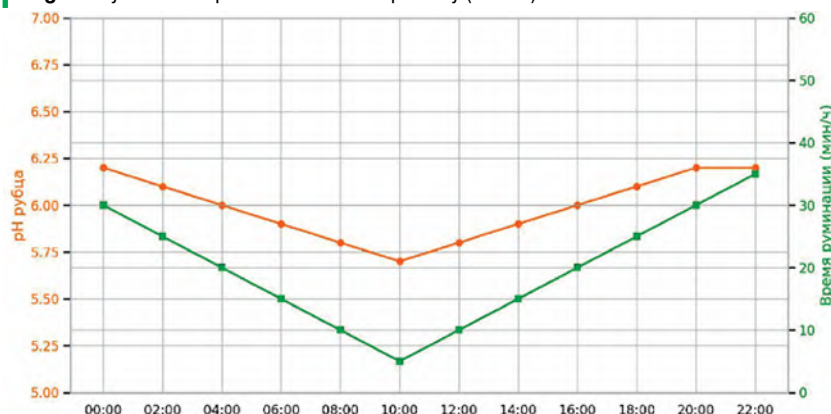
Table 3. Effect of diets on pH and rumination

Рацион	Доля концентратов, %	Средний pH рубца	Время руминации, мин/день	СКАР (pH < 5,8)
Базовый (контроль)	40	6,2	450	Нет
Высококонцентратный	60	5,7	420	Да
Высоковолокнистый	30	6,4	480	Нет

Примечание: данные рассчитаны на основе массива данных и литературы с учетом влияния рационов на pH и руминацию.

Рис. 4. Динамика pH и руминации за сутки (n = 10)

Fig. 4. Dynamics of pH and rumination per day (n = 10)



корреляции Пирсона между руминацией и pH варьировал от 0,65 до 0,82 (среднее 0,73), указывая на умеренную связь между качеством рациона и пищеварением (табл. 2).

Статистически значимые различия ($p < 0,05$) наблюдались между базовым и высококонцентратными рационами.

Болюс «Агробитест» (ООО «Агробитест», Россия) показал превосходство в мониторинге pH рубца (точность 97,8%), что делает его ключевым инструментом для диагностики СКАР, тогда как ошейник SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль) оказался более эффективным для оценки руминации (точность 89,4%). Комбинированный подход, интегрирующий данные обоих устройств, повысил общую точность диагностики метаболического статуса коров до 98,5%, что подчеркивает их взаимодополняющий характер и согласуется с выводами Нортон и др. [2].

Данные из файла «Массив данных.xlsx» подтверждают, что снижение pH ниже 6,0 совпадает с уменьшением руминации, особенно при высококонцентратных рационах (60% концентратов), где pH падал до 5,7, а руминация снижалась до 420 мин/день. Это требует корректировки доли волокна в рационе для поддержания здоровья рубца. Интеграция данных способствует созданию цифровых двойников, прогнозирующих здоровье и продуктивность животных, что отмечено в работе Чжан и др. [21].

Сравнение с другими исследованиями выявило как схожие, так и отличающиеся результаты. Например, исследование Антанайтис и др. [24] показало, что использование рубцовых болюсов для

мониторинга pH демонстрирует точность около 95%, что близко к полученным в настоящем исследовании — 97,8%. Однако в их работе корреляция между pH и руминацией была ниже ($r = 0,62$ против данного $r = 0,73$), что может быть связано с различиями в рационе и используемых устройствах (они применяли болюсы SmaXtec). Это указывает на то, что «Агробитест» (ООО «Агробитест», Россия) может быть более чувствительным к изменениям, связанным с руминацией.

В то же время Биккер и др. [25] изучали влияние высококонцентратных рационов на pH рубца и обнаружили более значительное снижение pH (до 5,5) при доле концентратов 65% по сравнению с авторским значением 5,7 при 60% концентратов. Это различие может быть обусловлено более

длительным периодом кормления высококонцентратным рационом в их исследовании (4 недели против нашего 2-недельного периода), что привело к более выраженному ацидозу. Кроме того, их исследование не включало мониторинг руминации, что ограничивает возможность прямого сравнения с данными авторов.

Еще одно исследование, проведенное Нойбауэр и др. [26], выявило, что ошейники, подобные SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль), обеспечивают точность мониторинга руминации на уровне 87%, что сопоставимо с 89,4% авторов. Однако они отметили, что точность может снижаться при высокой двигательной активности коров, чего авторы не наблюдали, возможно, из-за более спокойных условий содержания на ферме КубГАУ. Эти результаты подчеркивают важность учета условий эксперимента при интерпретации данных.

Полученные данные поднимают вопрос о долговременной стабильности устройств. Болюсы, такие как «Агробитест» (ООО «Агробитест», Россия), требуют калибровки каждые 6 месяцев для поддержания точности, тогда как ошейники SCR Heatime (Allflex Livestock Intelligence, Израиль) более устойчивы к внешним условиям, но могут быть подвержены износу при длительном использовании.

Интеграция данных через машинное обучение, как в данном исследовании, позволяет не только повысить точность диагностики, но и выявить паттерны, которые могут быть использованы для автоматизации управления стадом, включая корректировку рационов в реальном времени.

Выводы/Conclusions

Исследование подтвердило эффективность использования ошейника SCR Heatime (Aliflex Livestock Intelligence, Израиль) и рубцового болюса «Агробiotест» (ООО «Агробiotест», Россия) для мониторинга состояния молочных коров.

Точность мониторинга pH рубца болюсом «Агробiotест» составила 97,8%, что делает его надежным инструментом для диагностики SARA. Ошейник SCR Heatime показал точность мониторинга руминации на уровне 89,4%. Комбинированный подход увеличил общую точность до 98,5%, демонстрируя преимущества интеграции данных. Средний коэффициент корреляции Пирсона между руминацией и pH составил 0,73, указывая на умеренную связь

между этими параметрами. Высококонцентратный рацион с 60% концентратов снизил pH рубца до 5,7 и время руминации до 420 мин/день, вызывая риск СКАР при pH ниже 5,8. Напротив, высоковолокнистый рацион с 30% концентратов повысил pH до 6,4 и руминацию до 480 мин/день, способствуя здоровью рубца. Среднее время руминации составило 445 мин/день, а средний pH рубца — 6,1, что соответствует нормальным физиологическим показателям при базовом рационе с 40% концентратов.

Полученные результаты подчеркивают важность интеграции данных для точного контроля состояния коров и оптимизации рационов, что может снизить риск метаболических нарушений и повысить продуктивность.

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. Simitzis P., Tzanidakis C., Tzamaloukas O., Sossidou E. Contribution of Precision Livestock Farming Systems to the Improvement of Welfare Status and Productivity of Dairy Animals. *Dairy*. 2022; 3(1): 12–28. <https://doi.org/10.3390/dairy3010002>
2. Norton T., Chen C., Larsen M.L.V., Berckmans D. Review: Precision livestock farming: building 'digital representations' to bring the animals closer to the farmer. *Animal*. 2019; 13(12): 3009–3017. <https://doi.org/10.1017/S175173111900199X>
3. Головина Ю.И. Цифровизация в агропромышленном секторе России. Цифровые технологии в развитии современных экономических систем: Материалы II Всероссийской научно-исследовательской конференции с международным участием. Липецк: Липецкий государственный технический университет. 2024; 29–32. <https://elibrary.ru/wbqlab>
4. Дышекова А.А., Иванов З.А., Шабатукон И.А., Балкарова А.Р. Развитие цифровых технологий в агропромышленном комплексе России. Экономика, управление и финансы АПК: современные перспективы и инновации. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения Ш.М. Мамедова. Махачкала: Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джембулатова. 2024; 230–233. <https://elibrary.ru/jamffs>
5. Баккуев Э.С., Сарбашева Е.М. Влияние цифровой трансформации на динамику агроэкономического развития региона. Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия. Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти первого президента Кабардино-Балкарской Республики В.М. Кокова. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова. 2024; 261–263. <https://elibrary.ru/uzugih>
6. Панина О.В. Инновационные подходы к повышению эффективности сельского хозяйства в условиях трансформации агропромышленного комплекса. *Аграрная наука*. 2025; 393(04): 180–184. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-180-184>
7. Улыбина Л.В. Тенденции развития животноводческого комплекса России в контексте обеспечения продовольственной безопасности. *Аграрная наука*. 2025; 392(03): 144–149. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-144-149>
8. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021; 15(4): 6–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
9. Ценч Ю.С. Научнотехнический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022; 16(2): 4–13. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13>
10. Аванесян Д.Н. Цифровая трансформация в агропромышленном комплексе. 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; 538–540. <https://elibrary.ru/cfdjgl>

REFERENCES

1. Simitzis P., Tzanidakis C., Tzamaloukas O., Sossidou E. Contribution of Precision Livestock Farming Systems to the Improvement of Welfare Status and Productivity of Dairy Animals. *Dairy*. 2022; 3(1): 12–28. <https://doi.org/10.3390/dairy3010002>
2. Norton T., Chen C., Larsen M.L.V., Berckmans D. Review: Precision livestock farming: building 'digital representations' to bring the animals closer to the farmer. *Animal*. 2019; 13(12): 3009–3017. <https://doi.org/10.1017/S175173111900199X>
3. Golovina Yu.I. Digitalization in the agro-industrial sector of Russia. *Digital technologies in the development of modern economic systems: Proceedings of the II All-Russian research conference with international participation*. Lipetsk: Lipetsk State Technical University. 2024; 29–32 (in Russian). <https://elibrary.ru/wbqlab>
4. Dysheкова A.A., Ivanov Z.A., Shabatukov I.A., Balkarova A.R. Development of digital technologies in the agro-industrial complex of Russia. *Economy, management and finance of the agro-industrial complex: modern prospects and innovations. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the birth of Sh.M. Mamedov*. Makhachkala: Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov. 2024; 230–233 (in Russian). <https://elibrary.ru/jamffs>
5. Bakkuev E.S., Sarbasheva E.M. The Impact of Digital Transformation on the Dynamics of Regional Agro-economic Development. *Science, Education, and Business: A New View or a Strategy for Integrated Interaction. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of the First President of the Kabardino-Balkarian Republic V.M. Kokov*. Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 2024; 261–263 (in Russian). <https://elibrary.ru/uzugih>
6. Panina O.V. Innovative approaches to improving the efficiency of agriculture in the context of the transformation of the agro-industrial complex. *Agrarian science*. 2025; 393(04): 180–184 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-180-184>
7. Ulybina L.V. Trends in the development of the Russian livestock sector in the context of food security. *Agrarian science*. 2025; 392(03): 144–149 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-144-149>
8. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021; 15(4): 6–10 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
9. Tsench Yu.S. Scientific and Technological Potential as the Main Factor for Agricultural Mechanization Development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022; 16(2): 4–13 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13>
10. Avanesyan D.N. Digital transformation in the agro-industrial complex. *Collection of articles based on the materials of the annual scientific and practical conference of teachers on the results of research for 2024. Collection of conference papers*. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2025; 538–540 (in Russian). <https://elibrary.ru/cfdjgl>

11. Спешиллов Е.А., Богач Е.В. Информационные технологии и искусственный интеллект в агропроизводстве в условиях трансформации управленческих процессов. *Искусственный и естественный интеллект: алгоритмы, мышление и образовательные технологии. Материалы XXI Международного конгресса с элементами научной школы для молодых ученых*. М.: Московский университет им. С.Ю. Витте. 2025; 447–456. <https://elibrary.ru/igbisq>
12. Галкин А.И. Применение нейросетей и технологий больших данных в сельском хозяйстве: повышение эффективности и устойчивости агропроизводства. *Аграрная наука*. 2025; 393(04): 167–171. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-167-171>
13. Petrovski K.R., Cusack P., Malmo J., Cockcroft P. The Value of 'Cow Signs' in the Assessment of the Quality of Nutrition on Dairy Farms. *Animals*. 2022; 12(11): 1352. <https://doi.org/10.3390/ani12111352>
14. Лемеш Е.А. Повышение уровня молочной продуктивности дойных коров и улучшение качественных показателей молока при использовании разного состава рациона. *Современные тенденции развития аграрной науки. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции*. Брянск: Брянский государственный аграрный университет. 2024; 206–209. <https://elibrary.ru/kitiri>
15. Крупин Е.О. и др. Качественные показатели молока и кислородных продуктов при включении в состав рациона коров активированного цеолита и пробиотиков. *Аграрная наука*. 2024; 387(10): 72–79. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-72-79>
16. Головин А.В. Эффективность применения кальциевых солей жирных кислот при оптимизации энергетического питания молочных коров. *Аграрная наука*. 2025; 392(03): 76–82. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-76-82>
17. Pereira G.M., Sharpe K.T., Heins B.J. Evaluation of the RumiWatch system as a benchmark to monitor feeding and locomotion behaviors of grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(3): 3736–3750. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18952>
18. Rahmawati D., Ms A.U., Faradhilah N., Alfita R., Nahari R.V., Setiawan H. Design of a Real Time Cow Smart Collar Health and Position Monitoring System. *2023 IEEE 9th Information Technology International Seminar (ITIS)*. IEEE. 2023; 1–7. <https://doi.org/10.1109/ITIS59651.2023.10420353>
19. Džermeikaitė K., Bačėninaitė D., Antanaitis R. Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases. *Animals*. 2023; 13(5): 780. <https://doi.org/10.3390/ani13050780>
20. Hajnal É., Kovács L., Vakulya G. Dairy Cattle Rumen Bolus Developments with Special Regard to the Applicable Artificial Intelligence (AI) Methods. *Sensors*. 2022; 22(18): 6812. <https://doi.org/10.3390/s22186812>
21. Zhang F. et al. Research Advances and Prospect of Intelligent Monitoring Systems for the Physiological Indicators of Beef Cattle. *Smart Agriculture*. 2024; 6(4): 1–17 (на кит. яз.). <https://doi.org/10.12133/j.smartag.SA202312001>
22. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения. *Агроинженерия*. 2023; 25(4): 14–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>
23. Ayadi S., Ben Said A., Jabbar R., Aloulou C., Chabbouh A., Achballah A.B. Dairy Cow Rumination Detection: A Deep Learning Approach. Jemili I., Mosbah M. (eds.). *Distributed Computing for Emerging Smart Networks. Second International Workshop (DiCES-N 2020)*. Cham: Springer. 2020; 123–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65810-6_7
24. Antanaitis R., Anskienė L., Palubinskas G., Rutkauskas A., Baumgartner W. The Relationship between Reticuloruminal Temperature, Reticuloruminal pH, Cow Activity, and Clinical Mastitis in Dairy Cows. *Animals*. 2023; 13(13): 2134. <https://doi.org/10.3390/ani13132134>
25. Bikker J.P. et al. Technical note: Evaluation of an ear-attached movement sensor to record cow feeding behavior and activity. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(5): 2974–2979. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7560>
26. Neubauer V., Humer E., Kröger I., Braid T., Wagner M., Zebeli Q. Differences between pH of indwelling sensors and the pH of fluid and solid phase in the rumen of dairy cows fed varying concentrate levels. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2018; 102(1): 343–349. <https://doi.org/10.1111/jpn.12675>
11. Speshilov E.A., Bogach E.V. Information technologies and artificial intelligence in agricultural production in the context of the transformation of management processes. *Artificial and natural intelligence: algorithms, thinking and educational technologies: Proceedings of the XXI International congress with elements of a scientific school for young scientists*. Moscow: Moscow University named after S.Yu. Witte. 2025; 447–456 (in Russian). <https://elibrary.ru/igbisq>
12. Galkin A.I. Application of neural networks and big data technologies in agriculture: increasing the efficiency and sustainability of agricultural production. *Agrarian science*. 2025; 393(04): 167–171 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-167-171>
13. Petrovski K.R., Cusack P., Malmo J., Cockcroft P. The Value of 'Cow Signs' in the Assessment of the Quality of Nutrition on Dairy Farms. *Animals*. 2022; 12(11): 1352. <https://doi.org/10.3390/ani12111352>
14. Lemesh E.A. Increasing the level of milk productivity of dairy cows and improving the quality indicators of milk when using different diet compositions. *Modern trends in the development of agricultural science. Collection of scientific papers of the III International scientific and practical conference*. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2024; 206–209 (in Russian). <https://elibrary.ru/kitiri>
15. Krupin E.O. et al. Qualitative indicators of milk and fermented milk products when activated zeolite and probiotics are included in the diet of cows. *Agrarian science*. 2024; 387(10): 72–79 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-387-10-72-79>
16. Golovin A.V. Efficiency of using calcium salts of fatty acids in optimizing energy nutrition of dairy cows. *Agrarian science*. 2025; 392(03): 76–82 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-76-82>
17. Pereira G.M., Sharpe K.T., Heins B.J. Evaluation of the RumiWatch system as a benchmark to monitor feeding and locomotion behaviors of grazing dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2021; 104(3): 3736–3750. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18952>
18. Rahmawati D., Ms A.U., Faradhilah N., Alfita R., Nahari R.V., Setiawan H. Design of a Real Time Cow Smart Collar Health and Position Monitoring System. *2023 IEEE 9th Information Technology International Seminar (ITIS)*. IEEE. 2023; 1–7. <https://doi.org/10.1109/ITIS59651.2023.10420353>
19. Džermeikaitė K., Bačėninaitė D., Antanaitis R. Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases. *Animals*. 2023; 13(5): 780. <https://doi.org/10.3390/ani13050780>
20. Hajnal É., Kovács L., Vakulya G. Dairy Cattle Rumen Bolus Developments with Special Regard to the Applicable Artificial Intelligence (AI) Methods. *Sensors*. 2022; 22(18): 6812. <https://doi.org/10.3390/s22186812>
21. Zhang F. et al. Research Advances and Prospect of Intelligent Monitoring Systems for the Physiological Indicators of Beef Cattle. *Smart Agriculture*. 2024; 6(4): 1–17 (in Chinese). <https://doi.org/10.12133/j.smartag.SA202312001>
22. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023; 25(4): 14–25 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>
23. Ayadi S., Ben Said A., Jabbar R., Aloulou C., Chabbouh A., Achballah A.B. Dairy Cow Rumination Detection: A Deep Learning Approach. Jemili I., Mosbah M. (eds.). *Distributed Computing for Emerging Smart Networks. Second International Workshop (DiCES-N 2020)*. Cham: Springer. 2020; 123–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65810-6_7
24. Antanaitis R., Anskienė L., Palubinskas G., Rutkauskas A., Baumgartner W. The Relationship between Reticuloruminal Temperature, Reticuloruminal pH, Cow Activity, and Clinical Mastitis in Dairy Cows. *Animals*. 2023; 13(13): 2134. <https://doi.org/10.3390/ani13132134>
25. Bikker J.P. et al. Technical note: Evaluation of an ear-attached movement sensor to record cow feeding behavior and activity. *Journal of Dairy Science*. 2014; 97(5): 2974–2979. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7560>
26. Neubauer V., Humer E., Kröger I., Braid T., Wagner M., Zebeli Q. Differences between pH of indwelling sensors and the pH of fluid and solid phase in the rumen of dairy cows fed varying concentrate levels. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2018; 102(1): 343–349. <https://doi.org/10.1111/jpn.12675>

ОБ АВТОРАХ

Фёдор Евгеньевич Владимиров

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 fvladimirov21@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2480-5754>

Артём Рустамович Хакимов

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 arty.hv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4332-9274>

Сергей Сергеевич Юрочка

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 yssvim@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Дмитрий Юрьевич Павкин

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 dimqaqa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

Савр Олегович Базаев

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник
 sbazaeff@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3028-5081>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Fedor Evgenievich Vladimirov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
 fvladimirov21@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2480-5754>

Artyom Rustamovich Khakimov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
 arty.hv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4332-9274>

Sergey Sergeevich Yurochka

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
 yssvim@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2511-7526>

Dmitry Yurievich Pavkin

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
 dimqaqa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8769-8365>

Savr Olegovich Bazaev

Candidate of Agricultural Sciences, Researcher
 sbazaeff@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3028-5081>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
 5 1st Institutsky proezd, Moscow, 109428, 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!

И.В. Ржепаковский¹
С.И. Писков¹
С.С. Аванесян¹
М.Н. Сизоненко¹
С.Н. Поветкин¹
Л.Д. Тимченко¹
М.Ш. Шахбанов¹
А.А. Нагдалян¹ ✉
М.Б. Ребезов^{2,3}

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

²ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова, Москва, Россия

³Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ anagdalian@ncfu.ru

Поступила в редакцию: 01.09.2025

Одобрена после рецензирования: 13.09.2025

Принята к публикации: 28.09.2025

© Ржепаковский И.В., Писков С.И., Аванесян С.С., Сизоненко М.Н., Поветкин С.Н., Тимченко Л.Д., Шахбанов М.Ш., Нагдалян А.А., Ребезов М.Б.

Igor V. Rzhepakovsky¹
Sergey I. Piskov¹
Svetlana S. Avanesyan¹
Marina N. Sizonenko¹
Sergey N. Povetkin¹
Lyudmila D. Timchenko¹
Magomed Sh. Shakhbanov¹
Andrey A. Naghdalyan¹ ✉
Maksim B. Rebezov^{2,3}

¹North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

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

³Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

✉ anagdalian@ncfu.ru

Received by the editorial office: 01.09.2025

Accepted in revised: 13.09.2025

Accepted for publication: 28.09.2025

© Rzhepakovsky I.V., Piskov S. I., Avanesyan S.S., Sizonenko M.N., Povetkin S.N., Timchenko L.D., Shakhbanov M.Sh., Naghdalian A.A., Rebezov M.B.

Влияние различных методов сушки на некоторые физико-химические свойства и антиоксидантную активность гидролизата белков куриного эмбриона

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Прямое добавление биоактивных пептидных субстанций в пищевые продукты и фармацевтические средства ограничено из-за их физико-химической нестабильности. Условия обработки, направленные на стабилизацию белковых гидролизатов, могут влиять на их биоактивные свойства. В этом исследовании проведен сравнительный анализ влияния условий лиофильной и распылительной сушки на комплекс бета-циклодекстрина и кислотно-ферментативного гидролизата белков куриного эмбриона. Были изучены структурные, физико-химические и антиоксидантные свойства.

Методы. Морфологию комплекса циклодекстрина и гидролизата исследовали методом рентгеновской микротомографии. Количество хлорида натрия определяли методом титрования. Содержание белков, пептидов, аминокислот и других продуктов гидролиза определяли методом Варбурга — Кристиана. Уровень аминного азота оценивали методом титрования формальдегидом. Антиоксидантную активность порошков определяли методом поглощения АБТС радикала.

Результаты. Лиофильно высушенный комплекс отличался хаотично распределенными длинными игольчатыми структурами. Порошок комплекса после распылительной сушки характеризовался мелкими округлыми частицами и значительно большей (на 21,6%) насыпной плотностью. По гранулометрическим данным, в обоих исследуемых образцах преобладали частицы размером 44,7–89,4 мкм. Лиофилизат отличался расширением гранулометрического состава в сторону укрупнения частиц (71,5 мкм — 1,4 мм; 2,8–5,7 мм). Микротомографические параметры и расчетные индексы указывали на преимущество распылительной сушки в плане равномерности структуры, трехмерной симметрии частиц, стремящейся к изотропии. Образцы комплексов бета-циклодекстрина и гидролизата после лиофильной и распылительной сушки не отличались по основным химическим свойствам. Однако уровень антирадикальной активности комплекса почти вдвое уменьшился после дегидратации методом распылительной сушки — $31,0 \pm 4,1$ против $61,5 \pm 3,6$ мМ ТЭ/г. Это требует совершенствования и отработки процесса с возможной корректировкой скорости подачи субстанции, температуры нагрева или дополнительного включения защитных компонентов в субстанцию перед высушиванием распылением.

Ключевые слова: куриный эмбрион, гидролизат белков, пептиды, лиофильная сушка, распылительная сушка

Для цитирования: Ржепаковский И.В. и др. Влияние различных методов сушки на некоторые физико-химические свойства и антиоксидантную активность гидролизата белков куриного эмбриона. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 182–190.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-182-190>

Effect of different drying methods on some physicochemical properties and antioxidant activity of chicken embryo protein hydrolysate

ABSTRACT

Relevance. Direct addition of bioactive peptide substances to food products and pharmaceuticals is limited due to their physicochemical instability. Processing conditions aimed at stabilizing protein hydrolysates can influence their bioactive properties. In this study, a comparative analysis of the effect of freeze-drying and spray drying conditions on a complex of beta-cyclodextrin and acid-enzymatic hydrolysate of chicken embryo proteins was carried out. Structural, physicochemical and antioxidant properties were studied.

Methods. The morphology of the cyclodextrin complex and hydrolysate was studied by X-ray microtomography. The amount of sodium chloride was determined by titration. The content of proteins, peptides, amino acids and other hydrolysis products was determined by the Warburg — Christian method. The level of amine nitrogen was estimated by titration with formaldehyde. The antioxidant activity of the powders was determined by the ABTS radical absorption method.

Results. The freeze-dried complex was characterized by chaotically distributed long needle-like structures. The powder of the complex after spray drying was characterized by small rounded particles and a significantly higher (by 21.6%) bulk density. According to the granulometric data, particles of 44.7–89.4 μm in size predominated in both studied samples. The lyophilisate was characterized by an expansion of the granulometric composition towards larger particles (71.5 μm — 1.4 mm; 2.8–5.7 mm). Microtomographic parameters and calculated indices indicated the advantage of spray drying in terms of uniformity of structure, three-dimensional symmetry of particles tending to isotropy. The Samples of beta-cyclodextrin and hydrolysate complexes after lyophilic and spray drying did not differ in their main chemical properties. However, the level of antiradical activity of the complex decreased almost twofold after dehydration by spray drying — 31.0 ± 4.1 versus 61.5 ± 3.6 μM TE/g. This requires improvement and development of the process with possible adjustment of the substance feed rate, heating temperature, or additional inclusion of protective components in the substance before spray drying.

Key words: chicken embryo, protein hydrolysate, peptides, freeze drying, spray drying

For citation: Rzhepakovsky I.V. et al. Effect of different drying methods on some physicochemical properties and antioxidant activity of chicken embryo protein hydrolysate. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 182–190 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-182-190>

Введение/Introduction

В настоящее время в мировой науке и технологии интенсивно проводят работы, связанные с эффективной переработкой сырья животного происхождения [1–4], в том числе в интересах медицины [5–7]. Особое внимание обращается на белки куриного яйца в качестве источника пептидов для пищевой и фармацевтической промышленности [8, 9].

Пептиды — это органические вещества, образованные короткими цепочками 2–50 аминокислотных остатков, соединенных между собой пептидными связями. Некоторые пептиды выполняют важные функции в организме человека, включая регуляцию биологических процессов, участие в процессах иммунитета и проявление других биологических активностей, например антимикробной и антиоксидантной [10–13].

Учитывая количество различных аминокислот, их возможные варианты соединения в цепочки, а также вероятность химической модификации, существуют возможности получения молекул пептидов, обладающих как отдельными полезными активностями, так и комплексом активностей [14–17].

Недавние исследования показали, что белки и пептиды, полученные из куриных яиц, обладают различными типами антиоксидантной, противовоспалительной, иммуномодулирующей, антимикробной, противодиабетической, противораковой активностью, гипотензивным эффектом, хелатирующей и пенообразующей способностью [18–20].

Ранее авторами было подтверждено, что наличие большого комплекса белков внеэмбриональных и эмбриональных тканей птиц дает возможность получать широкий перечень пептидов, обладающих различными биологическими активностями. Проведенные исследования свидетельствуют о значительном увеличении биологической активности компонентов куриного яйца в процессе инкубации. Выявлено изменение качественного состава белков в различных компонентах куриного яйца, обусловленное в основном формированием новых органов и тканей в процессе эмбриогенеза. Моделирование желудочно-кишечного пищеварения *in vitro* привело к значительному увеличению антиоксидантной, противовоспалительной и гипотензивной активности [21].

Однако пептиды, кроме положительных качеств, обладают и некоторыми недостатками, в частности низким уровнем стабильности как в растворах, так и в биологических жидкостях организма. Поэтому, кроме создания технологии получения пептидсодержащих субстанций, требуется разработка приемов стабилизации данных комплексов как в процессе хранения, так и при применении [22].

Ранее для повышения стабильности и биологической активности пептидов авторами были предприняты попытки создания комплексов бета-циклодекстрина (β ЦД) и гидролизатов белков

куриного эмбриона. Бета-циклодекстрин — это циклический олигосахарид, состоящий из семи остатков глюкозы. Он широко используется в различных отраслях промышленности, включая фармацевтику, пищевую, косметическую и химическую [23–26].

В фармацевтике β ЦД применяется для улучшения растворимости и биодоступности лекарственных препаратов, особенно плохо растворимых в воде. В пищевой промышленности он используется как пищевая добавка (E459¹), стабилизатор и эмульгатор. В косметике β ЦД применяется для стабилизации активных компонентов, маскировки запахов и улучшения текстуры. Кроме того, β ЦД значительно улучшает процесс порошкообразования различных субстанций [27].

Основная задача данного исследования — сравнить способы получения стабилизированных порошков комплексов бета-циклодекстрина и смешанного гидролизата белков куриного эмбриона методами лиофильного и распылительного высушивания.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование проводили на базе межкафедральной научно-образовательной лаборатории экспериментальной иммуноморфологии, иммунопатологии и иммунобиотехнологии медико-биологического факультета Северо-Кавказского федерального университета в 2025 году (г. Ставрополь, Россия).

Использовали оплодотворенные куриные яйца Хайсекс Браун, приобретенные в ООО «Агрокормсервис плюс» (станция Гиагинская, Республика Адыгея, Россия).

Инкубировались яйца в инкубаторе Rcom Maru Deluxe Max 380 (Autoelex Co, Южная Корея) при температуре 37,5–37,8 °C, относительной влажности 45–50%, повороте лотков с периодичностью 1 час.

Сырьем для гидролиза служил обезжиренный сублимат эмбрионально-яичной массы, полученный из инкубированных до 10-х (HH36) суток куриных яиц.

Последовательный кислотнo-ферментативный гидролиз осуществляли по ранее отработанной авторами схеме с использованием соляной кислоты и ферментов: алкалаза (активность 50 000 ед/г), нейтраза (активность 1,75 AU/г). Полученный гидролизат очищали микрофильтрацией с помощью системы фильтрации Vivaflow 50 (Sartorius, Франция) с полиэфирсульфоновыми мембранами 0,2 мкм [28]. Затем проводили приготовление комплекса гидролизата с бета-циклодекстрином (β ЦД). Раствор, содержащий β ЦД и гидролизат (1:1), инкубировали при 50 °C в течение 60 мин. при постоянном перемешивании в шейкер-термостате ES 20/60 (Biosan, Латвия) [27].

¹ https://www.atamanchemicals.com/e459-beta--cyclodextrin_u27984/?lang=RU

Для лиофильного высушивания полученный комплекс β ЦД и гидролизата замораживали в морозильной камере («ПОЗиС», Россия) при температуре минус 38–40 °С в течение 4 ч. и дегидратировали в лиофильной сушилке BK-FD10T (Biobase, Китай). Рабочее давление в сушильной камере — 1–2 Па, температура сублиматора — минус 60–65 °С. Температура высушиваемой субстанции за процесс сушки не превышала 28 °С. Время сушки 2,0 л образца — 28 ч.

Распылительную сушку комплекса β -циклодекстрина и гидролизата белков куриного эмбриона осуществляли на распылительной сушилке Mini spray dryer B-290 (Buchi, Швейцария) при температуре на входе 170 °С, на выходе 80 °С, аспирация 100%, скорость подачи образца 10 мл/мин, давление газа 4 бар, скорость сушки 0,6 л/ч. Общее время сушки 2 л образца составило 3,5 ч.

Насыпную плотность порошков рассчитывали в соответствии с ОФС «Насыпная плотность и плотность после уплотнения» измерением объема образца вещества известной массы в градуированном цилиндре и рассчитывали по формуле (1):

$$D = m/V, \quad (1)$$

где: D — насыпная плотность, г/см³; m — масса порошка, г; V — наблюдаемый объем неуплотненного испытуемого образца, мл³.

Растворимость образца определяли как массу порошка, которая может раствориться в единице объема дистиллированной воды при 25 °С до выпадения осадка и создании насыщенного раствора, и измеряли в г / 100 мл.

Объемные структурные свойства полученных порошков исследовали методом рентгеновской микротомографии на рентгеновском микрокомпьютерном томографе «Продис.Компакт» («Продис», Россия). Для исследования порошки были помещены в пластиковые пробирки без особого дополнительного уплотнения. Образцы сканировали при следующих параметрах: напряжение 40 кВ, ток 50 мкА, без фильтра, размер пикселя 22,35 мкм, время сканирования 50 мин.

Протокол сканирования включал поворот на 360° с шагом 0,3°, время экспозиции 1000 мс на изображение, усреднение изображения — 1. Управление сканированием и трехмерная реконструкция образцов были выполнены с помощью программы proDIS (версия 1.4, «Продис», Россия).

Для количественного анализа внутренней структуры и оценки рентгеноплотности в единицах шкалы Хаунсфилда (HU) использовали программное обеспечение СТАн (версия: 1.18.4.0, Bruker, Бельгия). Визуализацию структур осуществляли с

помощью программы DataViewer (версия: 1.5.6.2, Bruker, Бельгия).

Внутренняя структура порошков была охарактеризована микротомографическими параметрами, такими как процент объема объекта (ПОО), отношение поверхности к объему (ОПО), индекс фрагментации (ИФ), степень анизотропии (СФ), индекс моделирования структуры (ИМС) [29].

Определение количества натрия хлорида проводили методом титрования [30].

Белки, пептиды, аминокислоты и другие продукты гидролиза определяли методом Варбурга — Кристиана [31].

Массовую долю низкомолекулярных производных белков (пептидов и аминокислот) определяли методом Варбурга — Кристиана² после осаждения белков трихлоруксусной кислотой.

Массовую долю пептидов и аминокислот (МДПА) рассчитывали по формуле (2):

$$МДПА = B/A \times 100, \quad (2)$$

где: A — содержание белка в исходном гидролизате, мг/мл; B — содержание белка в фильтрате, мг/мл.

Содержание аминного азота определяли методом титрования формальдегидом.

Антиоксидантную активность определяли методом поглощения АБТС радикала³. Для этого порошки растворяли в фосфатно-солевом буфере (PBS, pH 7,4) и исследовали после центрифугирования с использованием набора реагентов для количественной оценки антиоксидантной активности (FITCHEM) методом, описанным в предыдущей работе с некоторой модификацией. АБТС-активность по удалению радикалов выражали в мкМ эквивалентов тролокса на 1 г сухого вещества (мкМ ТЭ/г) [32].

Статистическую обработку количественных данных проводили с использованием программного пакета Biostat (Primer of Bio-statistic version 4.03). Применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA)⁴. Количественные данные представляли в виде $M \pm Sd$ (M — среднее значение, Sd — стандартное отклонение).

Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Порошки комплексов β -циклодекстрина и смешанного гидролизата (соляная кислота, алкалаза, нейтраза) сублимата яично-эмбриональной массы получали методами лиофильной и распылительной сушки (рис. 1).

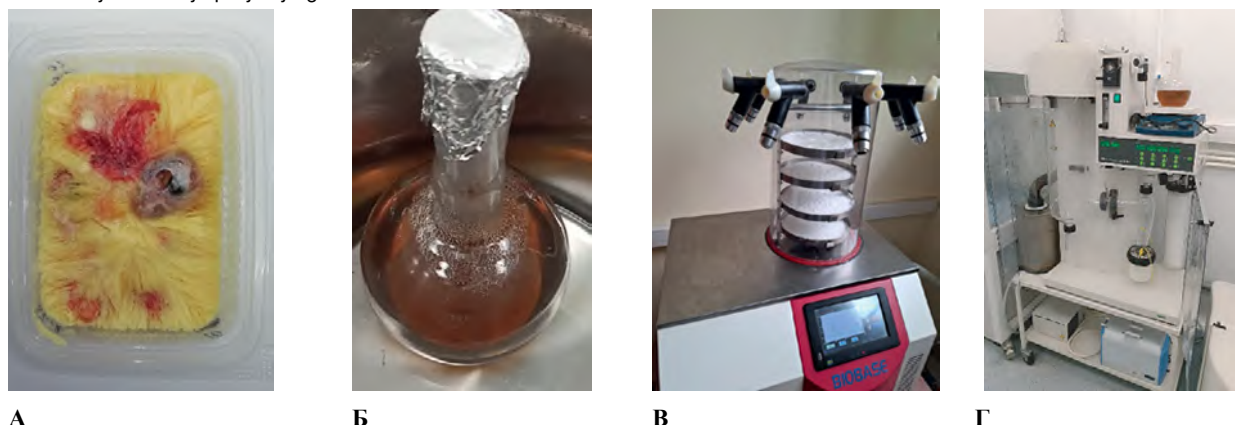
² Шлейкин А.Г., Скворцова Н.Н., Бландов А.Н. Биохимия. Лабораторный практикум. Ч. 2. Белки. Ферменты. Витамины: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО. 2015; 106.

³ <https://studfile.net/preview/2872890/page:15/>

⁴ <https://studfile.net/preview/1582408/page:3/>

Рис. 1. Процесс приготовления порошка комплекса β -циклодекстрина и смешанного гидролизата белков куриного эмбриона двумя способами: А — сублимат эмбрионально-яичной массы; Б — гидролизат эмбрионально-яичной массы; В — лиофильное высушивание; Г — дегидратация распылительной сушкой

Fig. 1. The process of preparing the powder of the β -cyclodextrin complex and the mixed hydrolysate of chicken embryo proteins in two ways: A — sublimate of the embryonic-egg mass; B — hydrolysate of the embryonic-egg mass; C — lyophilic drying; D — dehydration by spray drying



Выбранные методы сушки уже набрали популярность в пищевой и фармакологической промышленности. Лиофильная сушка выступает щадящей технологией дегидратации, обеспечивающей стабильность физико-химической и биологической активности пептидов. Распылительная сушка является широко используемой технологией микрокапсулирования благодаря низкой стоимости обработки и хорошей стабильности конечного продукта [33].

На рисунке 2 представлены полученные порошки комплексов β -циклодекстрина и гидролизата белков куриного эмбриона, высушенные методом лиофильной (β ЦД-СГАНл) и распылительной (β ЦД-СГАНр) сушки.

По внешнему виду порошок, полученный методом распылительной сушки, отличается более легкой текстурой, высоким уровнем равномерности и имеет более светлый оттенок. Визуализация порошков с применением рентгеновской микротомографии подтверждает более равномерный характер структур порошка, полученного методом распылительной сушки.

В отличие от длинных игольчатых структур лиофильно высушенного комплекса β ЦД-СГАНл, порошок β ЦД-СГАНр, полученный методом распылительной сушки, представлен в виде мелких округлых и неровных структур (рис. 3А).

Гранулометрический анализ исследуемых порошков показал, что и в комплексе β ЦД-СГАНл, и в β ЦД-СГАНр максимальное представительство имеют частицы 44,7–89,4 мкм. При этом порошок β ЦД-СГАНл отличался более широким гранулометрическим составом (рис. 3Б).

Спектр размерного распределения частиц комплекса β ЦД-СГАНл в сравнении с β ЦД-СГАНр включал крупные частицы (71,5 мкм — 1,4 мм; 2,8–5,7 мм).

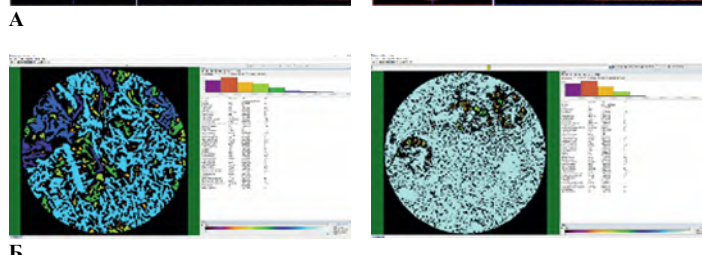
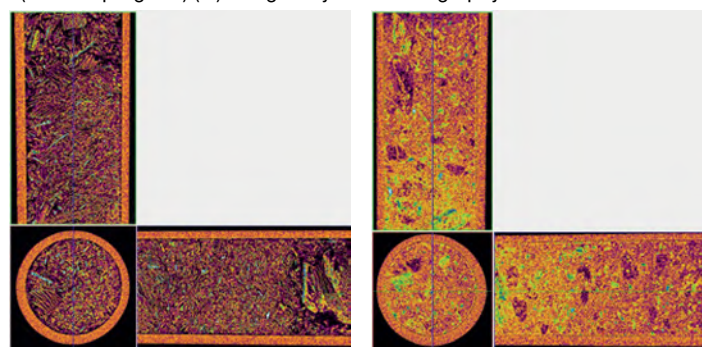
Рис. 2. Внешний вид порошков: β ЦД-СГАНл — комплекс, высушенный методом лиофильной сушки; β ЦД-СГАНр — комплекс, высушенный методом распылительной сушки

Fig. 2. Appearance of powders: β CD-MHANld — complex dried by freeze drying; β CD-MHANsd — complex dried by spray drying



Рис. 3. Визуализация порошков (в программе DataViewer) (А) и 2D-анализ (в программе CTAn) (Б) с использованием рентгеновской микротомографии

Fig. 3. Powder visualization (in DataViewer program) (A) and 2D analysis (in CTAn program) (B) using X-ray microtomography



β ЦД-СГАНл — комплекс, высушенный методом лиофильной сушки

β ЦД-СГАНр — комплекс, высушенный методом распылительной сушки

Стоит отметить, что время лиофильной сушки 2 л образца с учетом заморозки составил 32 ч., а того же объема методом распылительной сушки — 3,5 ч.

Анализ физико-химических показателей, представленных в таблице 1, свидетельствует об отсутствии достоверной разницы между порошками β ЦД-СГАНл и β ЦД-СГАНр по основным химическим показателям, характеризующим их биологически активные вещества.

Достоверное увеличение на 21,6% насыпной плотности при распылительной сушке подтверждает результаты, полученные при макро- и микровизуальном исследовании и связаны с особенностями технологического процесса высушивания.

Общая рентгеноплотность порошка, полученного при распылительной сушке, закономерно увеличилась на 12,9%, что связано с его более низкой (в 3,26 раза) регистрируемой пористостью.

Крупные рентгеноконтрастные игольчатые структуры лиофильно высушенного комплекса не смогли полностью компенсировать по рентгеноплотности наличие в этом порошке значительных пустот (табл. 2).

Микроструктурный рентгеновский анализ показал достоверную разницу между расчетными индексами, характеризующими распределение визуализируемого объема частиц порошков, полученных различными методами высушивания. Индексы структурного разделения и выпуклости поверхности в порошке β ЦД-СГАНр уменьшились, соответственно, на 30,5% и в 67,6 раза, что указывает на большую равномерность структур и сглаживание визуального регистрируемого объема частиц порошка в общие структуры. Вышеприведенные выводы хорошо подтверждаются визуализацией при 2D-анализе.

Степень анизотропии является показателем трехмерной структурной симметрии, которая в данном случае указывает на наличие или отсутствие преимущественной ориентации частиц порошка. Значение 0 соответствует полной изотропии, 1 — полной анизотропии.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что структуры порошка, полученного методом распылительной сушки, стремятся к большей изотропии, чем полученные методом лиофильной сушки.

Однако, несмотря на общую положительную с точки зрения технологии и экономической эффективности характеристику распылительной сушки, обращает на себя внимание снижение почти в 2 раза антирадикальной активности. Выявленный авторами факт согласуется с результатами других работ, согласно которым скорость поглощения супероксидного аниона, гидроксильного радикала и 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила (DPPH) оказались самыми высокими для порошка пептидного гидролизата белка утиного яйца, полученного лиофильно, и самыми низкими для порошка, полученного распылительной сушкой [34]. Это может

Таблица 1. Некоторые физико-химические показатели и антиоксидантная активность комплексов бета-циклодекстрина и гидролизатов белков куриного эмбриона, высушенных различными способами ($M \pm Sd$)

Table 1. Some physicochemical parameters and antioxidant activity of beta-cyclodextrin complexes and hydrolysates of chicken embryo proteins dried in different ways ($M \pm Sd$)

Показатели ($n = 10$)	β ЦД-СГАНл	β ЦД-СГАНр
Насыпная плотность, г/см ³	18,2 $\pm$ 1,3	23,2 $\pm$ 1,4*
Растворимость, г / 100 мл	3,7 $\pm$ 0,2	3,8 $\pm$ 0,2
Аминный азот, %	14,6 $\pm$ 1,9	13,1 $\pm$ 2,1
Белки, пептиды, аминокислоты и другие продукты гидролиза, %	28,8 $\pm$ 3,9	28,0 $\pm$ 3,1
Низкомолекулярные продукты гидролиза (после обработки ТХУ), %	20,6 $\pm$ 2,4	21,2 $\pm$ 2,2
Содержание натрия хлорида, %	12,3 $\pm$ 0,8	12,8 $\pm$ 0,7
Антирадикальная активность (АБТС), μ М ТЭ/г	61,5 $\pm$ 3,6	31,0 $\pm$ 4,1*

Примечание: * $p \leq 0,05$.

Таблица 2. Микротомографические параметры комплексов бета-циклодекстрина и гидролизатов белков куриного эмбриона, высушенных различными способами ($M \pm Sd$)

Table 2. Microtomographic parameters of beta-cyclodextrin complexes and hydrolysates of chicken embryo proteins dried in different ways ($M \pm Sd$)

Показатели ($n = 10$)	β ЦД-СГАНл	β ЦД-СГАНр
Процент объема объекта (ПОО), %	50,8 $\pm$ 4,9	85,0 $\pm$ 3,1*
Пористость порошка, %	49,2 $\pm$ 5,8	15,1 $\pm$ 2,5*
Общая рентгеноплотность (НУ)	-673 $\pm$ 30	-596 $\pm$ 35*
Отношение поверхности объекта к объему (ОПОО), 1/мм	41,9 $\pm$ 3,8	15,4 $\pm$ 2,1*
Структурное разделение (СР), мм	0,082 $\pm$ 0,0041	0,057 $\pm$ 0,0023*
Индекс выпуклости поверхности (ИВП), 1/мм	-0,46 $\pm$ 0,04	-31,1 $\pm$ 5,1*
Индекс моделирования структуры (ИМС)	-0,06 $\pm$ 0,002	-12,3 $\pm$ 1,5*
Степень анизотропии (СА)	0,48 $\pm$ 0,02	0,14 $\pm$ 0,01*

Примечание: * $p \leq 0,05$.

объясняться низкой температурой лиофильной сушки, препятствующей изменению пространственной структуры белковых пептидов и, следовательно, изменению их биоактивных свойств.

В то же время данные авторов идут в некий разрез с целым рядом результатов других исследователей, проводящих сравнительный анализ влияния лиофильной и распылительной сушек на биоактивные свойства белковых гидролизатов в пользу распылительной [35, 36]. Это, по всей видимости, обусловлено влиянием высокой температуры на биологически активные вещества, являющиеся донорами электронов для АБТС-радикала. Полагаем, данный факт может отрицательно сказаться и на других термолабильных соединениях, понизив различные специфические активности полученной субстанции.

Вышесказанное еще раз подтверждает, что изменения условий распылительной сушки, таких как температура воздуха на входе и скорость потока подачи, могут по-разному влиять на гигроскопичность и морфологию частиц образца, физико-химические и, как следствие, биоактивные свойства белкового гидролизата [37]. Поэтому

комплекс бета-циклодекстрина и гидролизата белков куриного эмбриона целесообразно изучить при различных вариациях условий распылительной сушки, что и выступит целью дальнейшего исследования.

Выводы/Conclusions

В настоящем исследовании в оптимизированных условиях получен комплекс включения β -циклодекстрина со смешанным гидролизатом (пептидными фракциями) белков куриного эмбриона.

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00178 «Разработка научно-методических основ переработки куриного яйца для производства функциональных пептидсодержащих пищевых ингредиентов» (дата обращения: 25.07.25).
<https://rscf.ru/project/24-26-00178>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чанов И.М. Применение методов *in silico* при направленном гидролизе сывороточных белков. *Аграрная наука*. 2024; (7): 170–178. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-384-7-170-178>
2. Duffuler P., Bhullar K.S., de Campos Zani S.C., Wu J. Bioactive Peptides: From Basic Research to Clinical Trials and Commercialization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022; 70 (12): 3585–3595. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06289>
3. Takahashi D., Shukla S.K., Prakash O., Zhang G. Structural determinants of host defense peptides for antimicrobial activity and target cell selectivity. *Biochimie*. 2010; 92(9): 1236–1241. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2010.02.023>
4. Зинина О.В., Меренкова С.П., Ребезов М.Б., Вишнякова Е.А. Исследование свойств белковых гидролизатов, полученных из желтков 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>
5. Okasha H. Fundamental uses of peptides as a new model in both treatment and diagnosis. *Recent Patents on Biotechnology*. 2024; 18 (2): 110–127. <https://doi.org/10.2174/1872208317666230512143508>
6. Lebleu B. Feature collection in peptide therapeutics: current applications and future directions. *Biomedicines*. 2024; 12 (12): 2919. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12122919>
7. Hou H. *et al.* A Review of Bioactive Peptides: Chemical Modification, Structural Characterization and Therapeutic Applications. *Journal of Biomedical Nanotechnology*. 2020; 16(12): 1687–1718. <https://doi.org/10.1166/jbn.2020.3001>
8. Song L., Chen Y., Liu H., Zhang X. Preparation, biological activities, and potential applications of hen egg-derived peptides: A review. *Foods*. 2024; 13: 885. <https://doi.org/10.3390/foods13060885>
9. Abeer M.M., Trajkovic S., Brayden D.J., Measuring the oral bioavailability of protein hydrolysates derived from food sources: A critical review of current bioassays. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2021; 144(2021): 112275. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112275>
10. Chen Q. *et al.* Impact of Antifouling PEG Layer on the Performance of Functional Peptides in Regulating Cell Behaviors. *Journal of the American Chemical Society*. 2019; 141(42): 16772–16780. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b07105>
11. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M., Galimov D., Khayrullin M., Burkov P. Physicochemical, functional, and technological properties of protein hydrolysates obtained by microbial fermentation of broiler chicken gizzards. *Fermentation*. 2022; 8(7): 317. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070317>
12. Ma J., Yan L., Yang J., He Yu., Wu Li. Effect of modification strategies on the biological activity of peptides/proteins. *ChemBioChem*. 2024; 25(3). <https://doi.org/10.1002/cbic.202300481>

Полученные результаты доказывают возможность использования как распылительной, так и лиофильной сушки в целях стабилизации комплексов бета-циклодекстрина и гидролизатов белков куриного эмбриона. Однако для проведения высушивания методом распылительной сушки требуются совершенствование и отработка процесса с возможной корректировкой скорости подачи субстанции, температуры нагрева или дополнительного включения защитных компонентов в субстанцию перед высушиванием.

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 funded by the Russian Science Foundation grant No. 24-26-00178 “Development of scientific and methodological foundations for processing chicken eggs for the production of functional peptide-containing food ingredients” (accessed: 07/25/25).
<https://rscf.ru/project/24-26-00178>

REFERENCES

1. Chanov I.M. Application of *in silico* methods for targeted hydrolysis of whey proteins. *Agrarian science*. 2024; (7): 170–178 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-384-7-170-178>
2. Duffuler P., Bhullar K.S., de Campos Zani S.C., Wu J. Bioactive Peptides: From Basic Research to Clinical Trials and Commercialization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022; 70 (12): 3585–3595. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06289>
3. Takahashi D., Shukla S.K., Prakash O., Zhang G. Structural determinants of host defense peptides for antimicrobial activity and target cell selectivity. *Biochimie*. 2010; 92(9): 1236–1241. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2010.02.023>
4. 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>
5. Okasha H. Fundamental uses of peptides as a new model in both treatment and diagnosis. *Recent Patents on Biotechnology*. 2024; 18 (2): 110–127. <https://doi.org/10.2174/1872208317666230512143508>
6. Lebleu B. Feature collection in peptide therapeutics: current applications and future directions. *Biomedicines*. 2024; 12 (12): 2919. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12122919>
7. Hou H. *et al.* A Review of Bioactive Peptides: Chemical Modification, Structural Characterization and Therapeutic Applications. *Journal of Biomedical Nanotechnology*. 2020; 16(12): 1687–1718. <https://doi.org/10.1166/jbn.2020.3001>
8. Song L., Chen Y., Liu H., Zhang X. Preparation, biological activities, and potential applications of hen egg-derived peptides: A review. *Foods*. 2024; 13: 885. <https://doi.org/10.3390/foods13060885>
9. Abeer M.M., Trajkovic S., Brayden D.J., Measuring the oral bioavailability of protein hydrolysates derived from food sources: A critical review of current bioassays. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2021; 144(2021): 112275. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112275>
10. Chen Q. *et al.* Impact of Antifouling PEG Layer on the Performance of Functional Peptides in Regulating Cell Behaviors. *Journal of the American Chemical Society*. 2019; 141(42): 16772–16780. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b07105>
11. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M., Galimov D., Khayrullin M., Burkov P. Physicochemical, functional, and technological properties of protein hydrolysates obtained by microbial fermentation of broiler chicken gizzards. *Fermentation*. 2022; 8(7): 317. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070317>
12. Ma J., Yan L., Yang J., He Yu., Wu Li. Effect of modification strategies on the biological activity of peptides/proteins. *ChemBioChem*. 2024; 25(3). <https://doi.org/10.1002/cbic.202300481>

13. Зинина О.В., Николина А.Д., Хвостов Д.В., Ребезов М.Б., Завьялов С.Н., Ахмедзянов Р.В. Белковый гидролизат как источник биоактивных пептидов в пищевой продукции диабетического питания. *Пищевые системы*. 2023; 6(4): 440–448. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-440-448>
14. Шевченко В.П., Вьюнова Т.В., Андреева Л.А., Нагаев И.Ю., Шевченко К.В., Мясоедов Н.Ф. Специальные подходы для синтеза и использования пептидных фрагментов и их аналогов при конструировании лекарственных средств: обзор. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2024; 518(1): 3–22. <https://doi.org/10.31857/S2686953524050014>
15. de Araújo R.S.A., Mendonça F.J.B., Scotti M.T., Scotti L. Protein modeling. *Physical Sciences Reviews*. 2023; 8(4): 567–582. <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0161>
16. Chavan S.S., Saze H., Tanaka F. Chemical modification of peptides and proteins using spirooxindole oxirane derivatives. *Advanced Synthesis and Catalysis*. 2023; 365(13): 2171–2176. <https://doi.org/10.1002/adsc.202300578>
17. Окусханова Э.К., Асенова Б.К., Смольникова Ф.Х., Ребезов М.Б. Исследование химического, аминокислотного состава и микро-структуры мяса марала крестьянского хозяйства «Багратион» Восточно-Казахстанской области. *АПК России*. 2021; 28(5): 671–677. <https://elibrary.ru/losohw>
18. Zhao W., Zhang D., Yu Z., Ding L., Liu J. Novel membrane peptidase inhibitory peptides with activity against angiotensin converting enzyme and dipeptidyl peptidase IV identified from hen eggs. *Journal of Functional Foods*. 2020; 64: 103649. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103649>
19. Lee J.H., Lee J.-E., Paik H.-D. Immunomodulatory activity of egg yolk protein hydrolysates prepared by novel two-step hydrolysis: A study of mechanism and stability after in vitro digestion model. *Poultry Science*. 2022; 101: 101802. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101802>
20. Li Z., Huang X., Tang Q., Ma M., Jin Y., Sheng L. Functional properties and extraction techniques of chicken egg white proteins. *Foods*. 2022; 11: 2434. <https://doi.org/10.3390/foods11162434>
21. Rzhepakovsky I., Piskov S., Avanesyan S., Kurchenko V., Shakhbanov M., Sizonenko M., Timchenko L., Kovaleva I., Özbek H.N., Gogus F., Ulrih N., Nagdalian A. Analysis of bioactive compounds of hen egg components at the first half of incubation. *Journal of Food Science*. 2024; 89: 8784–8803. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17596>
22. Lamers C. Overcoming the shortcomings of peptide-based therapeutics. *Future Drug Discovery*. 2022; 4(2). <https://doi.org/10.4155/fdd-2022-0005>
23. Искинеева А.С., Мустафаева А.К. Новая водорастворимая форма витаминов А и Е в форме комплекса включения с бета-циклодекстрином. *Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: сборник материалов VIII Всероссийской конференции, посвященной 60-летию ПАО «Химпром»*. Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. 2020; 187. <https://elibrary.ru/lkocxe>
24. Шиловская М.О. Получение и биофармацевтическая оценка комплексов леводопы с бета-циклодекстрином. *Белые цветы: сборник тезисов XI Международного молодежного научного медицинского форума, посвященного 150-летию Н.А. Семашко*. Казань: Казанский государственный медицинский университет. 2024; 1114–1115. <https://elibrary.ru/gsdpxy>
25. Рудометова Н.В. Бета-циклодекстрины как инструмент создания новых конкурентоспособных пищевых ингредиентов. *Продовольственная безопасность и научное обеспечение развития отечественной индустрии конкурентоспособных пищевых ингредиентов. Материалы Международной научно-практической конференции*. СПб.: Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок. 2015; 180–182. <https://elibrary.ru/vjogyp>
26. Воробьева Н., Корнелюк О., Ложко Д. Стабильность рекомбинантного белка AIMP1/P43 людини в наноконкомпозитном комплексі з бета-циклодекстрином. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Проблеми регуляції фізіологічних функцій*. 2016; 1(20): 15–18. <https://elibrary.ru/wilvod>
27. Halavach T.M. et al. Influence of complexation with β - and γ -cyclodextrin on bioactivity of whey and colostrum peptides. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24: 13987. <https://doi.org/10.3390/ijms241813987>
28. Rzhepakovsky I.V., Timchenko L.D., Areshidze D.A., Avanesyan S.S., Budkevich E.V., Piskov S.I., Kochergin S.G. Antioxidant activity of chicken embryo tissues powder obtained by different methods of hydrolysis. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2019; 27: 127–133. <https://keypublishing.org/jhed/wp-content/uploads/2020/07/10.-Full-paper-Igor-Rzhepakovsky.pdf>
13. Zinina O.V., Nikolina A.D., Khvostov D.V., Rebezov M.B., Zavyalov S.N., Akhmedzyanov R.V. Protein hydrolysate as a source of bioactive peptides in diabetic food products. *Food systems*. 2023; 6(4): 440–448 (in Russian). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-440-448>
14. Shevchenko V.P., Vyunova T.V., Andreeva L.A., Nagaev I.Yu., Shevchenko K.V., Myasoedov N.F. Special approaches for the synthesis and use of peptide fragments and their analogues in the design of medicines. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Science*. 2024; 518(1): 3–22 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2686953524050014>
15. de Araújo R.S.A., Mendonça F.J.B., Scotti M.T., Scotti L. Protein modeling. *Physical Sciences Reviews*. 2023; 8(4): 567–582. <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0161>
16. Chavan S.S., Saze H., Tanaka F. Chemical modification of peptides and proteins using spirooxindole oxirane derivatives. *Advanced Synthesis and Catalysis*. 2023; 365(13): 2171–2176. <https://doi.org/10.1002/adsc.202300578>
17. Okuskhanova E.K., Asenova B.K., Smolnikova F.Kh., Rebezov M.B. Studying the chemical, amino acid composition and microstructure of the maral meat of the farm “Bagration” in East Kazakhstan oblast. *Agro-industrial complex of Russia*. 2021; 28(5): 671–677 (in Russian). <https://elibrary.ru/losohw>
18. Zhao W., Zhang D., Yu Z., Ding L., Liu J. Novel membrane peptidase inhibitory peptides with activity against angiotensin converting enzyme and dipeptidyl peptidase IV identified from hen eggs. *Journal of Functional Foods*. 2020; 64: 103649. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103649>
19. Lee J.H., Lee J.-E., Paik H.-D. Immunomodulatory activity of egg yolk protein hydrolysates prepared by novel two-step hydrolysis: A study of mechanism and stability after in vitro digestion model. *Poultry Science*. 2022; 101: 101802. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101802>
20. Li Z., Huang X., Tang Q., Ma M., Jin Y., Sheng L. Functional properties and extraction techniques of chicken egg white proteins. *Foods*. 2022; 11: 2434. <https://doi.org/10.3390/foods11162434>
21. Rzhepakovsky I., Piskov S., Avanesyan S., Kurchenko V., Shakhbanov M., Sizonenko M., Timchenko L., Kovaleva I., Özbek H.N., Gogus F., Ulrih N., Nagdalian A. Analysis of bioactive compounds of hen egg components at the first half of incubation. *Journal of Food Science*. 2024; 89: 8784–8803. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17596>
22. Lamers C. Overcoming the shortcomings of peptide-based therapeutics. *Future Drug Discovery*. 2022; 4(2). <https://doi.org/10.4155/fdd-2022-0005>
23. Iskineeva A.S., Mustafayeva A.K. A new water-soluble form of vitamins A and E in the form of an inclusion complex with beta-cyclodextrin. *Actual issues of chemical engineering and environmental protection: collection of materials of the VIII All-Russian conference dedicated to the 60th anniversary of PJSC “Khimprom”*. Cheboksary: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov. 2020; 187 (in Russian). <https://elibrary.ru/lkocxe>
24. Shilovskaya M.O. Production and biopharmaceutical evaluation of levodopa complexes with beta-cyclodextrin. *White flowers: collection of abstracts of the XI International Youth Scientific Medical Forum dedicated to the 15th anniversary of N.A. Semashko*. Kazan: Kazan State Medical University. 2024; 1114–1115 (in Russian). <https://elibrary.ru/gsdpxy>
25. Rudometova N.V. Beta-cyclodextrins as a tool for creating new competitive food ingredients. Food security and scientific support for the development of the domestic industry of competitive food ingredients. *Proceedings of the International scientific and practical conference. St. Petersburg: All-Russian Research Institute of Food Additives*. 2015; 180–182 (in Russian). <https://elibrary.ru/vjogyp>
26. Vorobyova N., Kornelyuk O., Lozhko D. Stability of recombinant human AIMP1/P43 protein in a nanocomposite complex with beta-cyclodextrin. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Problems of Physiological Functions Regulation*. 2016; 1(20): 15–18 (in Ukrainian). <https://elibrary.ru/wilvod>
27. Halavach T.M. et al. Influence of complexation with β - and γ -cyclodextrin on bioactivity of whey and colostrum peptides. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24: 13987. <https://doi.org/10.3390/ijms241813987>
28. Rzhepakovsky I.V., Timchenko L.D., Areshidze D.A., Avanesyan S.S., Budkevich E.V., Piskov S.I., Kochergin S.G. Antioxidant activity of chicken embryo tissues powder obtained by different methods of hydrolysis. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2019; 27: 127–133. <https://keypublishing.org/jhed/wp-content/uploads/2020/07/10.-Full-paper-Igor-Rzhepakovsky.pdf>

29. Naghdalyan A., Rzhepakovsky I., Siddiqui S., Piskov S., Oboturova N., Timchenko L., Lodygin A., Blinov A., Ibrahim S. Analysis of the content of mechanically separated poultry meat in sausage using computing microtomography. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2021; 100: 103918. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103918>
30. Sezey M., Adun P. Validation of mohr titration method to determine salt in olive and olive brine. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*. 2019; 6(3): 329–334. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.496563>
31. Prakash J.B., Pandey S., Goswami S.K. Estimation of proteins by UV spectrophotometric method. *Protocols in Biochemistry and Clinical Biochemistry*. 2025; 97. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13945-1.00044-4>
32. Rzhepakovsky I., Anusha Siddiqui S., Avanesyan S., Benlidayi M., Dhinra K., Dolgalev A., Grimm W.D. Anti-arthritis effect of chicken embryo tissue hydrolyzate against adjuvant arthritis in rats (X-ray microtomographic and histopathological analysis). *Food Science & Nutrition*. 2021; 9(10): 5648–5669. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2529>
33. Wang H., Tong X., Yuan Y., Peng X., Zhang Q., Zhang S., Li Y. Effect of spray drying and freeze drying on the properties of soybean hydrolysates. *Journal of Chemistry*, 2020; 9201457. <https://doi.org/10.1155/2020/9201457>
34. Du T., Xu J., Zhu S., Yao X., Guo J., Lv W. Effects of spray drying, freeze drying, and vacuum drying on physicochemical and nutritional properties of protein peptide powder from salted duck egg white. *Frontiers in Nutrition*, 2022; 9: 1026903. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1026903>
35. Kumar D., Mishra A., Tarafdar A., Kumar Y., Verma K., Aluko R., Badgujar P.C. in vitro bioaccessibility and characterisation of spent hen meat hydrolysate powder prepared by spray and freeze-drying techniques. *Process Biochemistry*. 2021; 105: 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.03.029>
36. Liu T., Wang Y., Yu X., Li H., Ji L., Sun Y., Liu H. Effects of freeze-drying and spray-drying on the physical and chemical properties of Perinereis aibuhitensis hydrolysates: Sensory characteristics and antioxidant activities. *Food Chemistry*. 2022; 382: 132317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132317>
37. Sepúlveda Rincón C., Vásquez P., Zapata Montoya J. Effect of spray-drying conditions on the physical and antioxidant properties of a hydrolysate from red tilapia (*Oreochromis spp.*) viscera. *Food Science and Technology*. 2023; 43: e101522. <https://doi.org/10.1590/fst.101522>

ОБ АВТОРАХ

Игорь Владимирович Ржепаковский¹

кандидат биологических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
irzhepakovskii@ncfu.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2632-8923>

Сергей Иванович Писков¹

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
spiskov@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5558-5486>

Светлана Суриновна Аванесян¹

научный сотрудник
savanesian@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3536-1247>

Марина Николаевна Сизоненко¹

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
msizonenko@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1009-7112>

Сергей Николаевич Поветкин¹

кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры пищевых технологий и инжиниринга
spovetkin@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8293-3984>

Людмила Дмитриевна Тимченко¹

доктор ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник
ltimchenko@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2011-880X>

29. Naghdalyan A., Rzhepakovsky I., Siddiqui S., Piskov S., Oboturova N., Timchenko L., Lodygin A., Blinov A., Ibrahim S. Analysis of the content of mechanically separated poultry meat in sausage using computing microtomography. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2021; 100: 103918. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103918>

30. Sezey M., Adun P. Validation of mohr titration method to determine salt in olive and olive brine. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*. 2019; 6(3): 329–334. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.496563>

31. Prakash J.B., Pandey S., Goswami S.K. Estimation of proteins by UV spectrophotometric method. *Protocols in Biochemistry and Clinical Biochemistry*. 2025; 97. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13945-1.00044-4>

32. Rzhepakovsky I., Anusha Siddiqui S., Avanesyan S., Benlidayi M., Dhinra K., Dolgalev A., Grimm W.D. Anti-arthritis effect of chicken embryo tissue hydrolyzate against adjuvant arthritis in rats (X-ray microtomographic and histopathological analysis). *Food Science & Nutrition*. 2021; 9(10): 5648–5669. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2529>

33. Wang H., Tong X., Yuan Y., Peng X., Zhang Q., Zhang S., Li Y. Effect of spray drying and freeze drying on the properties of soybean hydrolysates. *Journal of Chemistry*, 2020; 9201457. <https://doi.org/10.1155/2020/9201457>

34. Du T., Xu J., Zhu S., Yao X., Guo J., Lv W. Effects of spray drying, freeze drying, and vacuum drying on physicochemical and nutritional properties of protein peptide powder from salted duck egg white. *Frontiers in Nutrition*, 2022; 9: 1026903. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1026903>

35. Kumar D., Mishra A., Tarafdar A., Kumar Y., Verma K., Aluko R., Badgujar P.C. in vitro bioaccessibility and characterisation of spent hen meat hydrolysate powder prepared by spray and freeze-drying techniques. *Process Biochemistry*. 2021; 105: 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.03.029>

36. Liu T., Wang Y., Yu X., Li H., Ji L., Sun Y., Liu H. Effects of freeze-drying and spray-drying on the physical and chemical properties of Perinereis aibuhitensis hydrolysates: Sensory characteristics and antioxidant activities. *Food Chemistry*. 2022; 382: 132317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132317>

37. Sepúlveda Rincón C., Vásquez P., Zapata Montoya J. Effect of spray-drying conditions on the physical and antioxidant properties of a hydrolysate from red tilapia (*Oreochromis spp.*) viscera. *Food Science and Technology*. 2023; 43: e101522. <https://doi.org/10.1590/fst.101522>

ABOUT THE AUTHORS

Igor Vladimirovich Rzhepakovsky¹

Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor, Leading Researcher
irzhepakovskii@ncfu.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2632-8923>

Sergey Ivanovich Piskov¹

Candidate of Biological Sciences,
Leading Researcher
spiskov@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5558-5486>

Svetlana Surenovna Avanesyan¹

Researcher
savanesian@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3536-1247>

Marina Nikolaevna Sizonenko¹

Candidate of Biological Sciences,
Leading Researcher
msizonenko@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1009-7112>

Sergey Nikolaevich Povetkin¹

Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor
of the Department of Food Technology and Engineering
spovetkin@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8293-3984>

Lyudmila Dmitrievna Timchenko¹

Doctor of Veterinary Sciences, Professor,
Chief Researcher
ltimchenko@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2011-880X>

Магомед Шамилович Шахбанов¹

младший научный сотрудник медико-биологического
факультета
mshakhbanov@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2580-7233>

Андрей Ашотович Нагдалян¹

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
anagdalian@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Максим Борисович Ребезов^{2, 3}

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

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

¹Северо-Кавказский федеральный университет,
ул. им. Пушкина, 1, Ставрополь, 355002, Россия

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

³Уральский государственный аграрный университет,
ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

Magomed Shamilovich Shakhbanov¹

Junior Researcher at the Faculty
of Medicine and Biology
mshakhbanov@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2580-7233>

Andrey Ashotovitch Naghdalyan¹

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
anagdalian@ncfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Maksim Borisovich Rebezov^{2, 3}

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

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

¹North Caucasus Federal University,
1 Pushkin Str., Stavropol, 355002, Russia

²V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems
of the Russian Academy of Sciences,
26 Talalikhin Str., Moscow, 109316, Russia

³Ural State Agrarian University,
42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, 620075, Russia

УДК 371.545:37(470)

Краткое сообщение



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-191-196

Л.А. Паршутина¹ ✉О.Л. Юрчук²И.В. Гайдамашко¹

¹Федеральный научный центр
психологических
и междисциплинарных
исследований, Москва, Россия

²Московский государственный
психолого-педагогический
университет, Москва, Россия

✉ parshutinala@mail.ru

Поступила в редакцию: 25.08.2025

Одобрена после рецензирования: 14.07.2025

Принята к публикации: 29.07.2025

© Паршутина Л.А., Юрчук О.Л.,
Гайдамашко И.В.

Научно-методическая и психологическая поддержка молодого учителя сельской школы в процессе цифровой трансформации

РЕЗЮМЕ

Профессиональная адаптация молодых педагогов в условиях сельских образовательных организаций представляет собой многоаспектную проблему, требующую комплексного научно-методического и психологического сопровождения. Настоящее исследование направлено на изучение эффективности различных форм профессиональной поддержки начинающих учителей и разработку научно обоснованной системы их сопровождения в современных условиях. В работе применен смешанный методологический подход, включающий количественные (анкетирование, психодиагностические методики) и качественные (глубинные интервью) методы исследования молодых педагогов сельских школ. Эмпирическую базу составили 35 молодых учителей из пяти регионов Российской Федерации. Результаты исследования показали, что ключевыми факторами успешной профессиональной адаптации выступают качество наставнических отношений, уровень психологической готовности педагогов и доступность методической поддержки. Разработанная комплексная модель сопровождения продемонстрировала высокую эффективность в повышении профессиональной готовности и компенсации профессиональных дефицитов молодых педагогов сельских школ.

Ключевые слова: молодой учитель, сельская школа, методическая поддержка, психологическая поддержка, профессиональная адаптация, педагогическое наставничество, профессиональные дефициты

Для цитирования: Паршутина Л.А., Юрчук О.Л., Гайдамашко И.В. Научно-методическая и психологическая поддержка молодого учителя сельской школы в процессе цифровой трансформации. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 191–196.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-191-196>

Short communications



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-191-196

Lyudmila A. Parshutina¹ ✉Olga L. Yurchuk²Igor V. Gaidamashko¹

¹Coordination Center for
the Development of Psychological and
Pedagogical Assistance in the Education
System of the Russian Federation,
Moscow, Russia

²Moscow State University of Psychology
and Education, Moscow, Russia

✉ parshutinala@mail.ru

Received by the editorial office: 25.08.2025

Accepted in revised: 14.07.2025

Accepted for publication: 29.07.2025

© Parshutina L.A., Yurchuk O.L.,
Gaidamashko I.V.

Scientific-methodological and psychological support for the young rural school teacher in the process of digital transformation

ABSTRACT

Professional adaptation of early-career teachers in rural educational organizations constitutes a multifaceted problem that requires comprehensive scientific-methodological and psychological support. This study is aimed at examining the effectiveness of various forms of professional support for novice teachers and at developing a scientifically grounded system of their support under contemporary conditions. The study employed a mixed methodological approach, including quantitative (questionnaires, psychodiagnostic methods) and qualitative (in-depth interviews) methods for studying early-career teachers in rural schools. The empirical base consisted of 35 early-career teachers from five regions of the Russian Federation. The results of the study showed that the key factors in successful professional adaptation are the quality of mentoring relationships, the level of teachers' psychological readiness, and the availability of methodological support. The developed comprehensive support model demonstrated high effectiveness in enhancing professional readiness and compensating for professional deficits among early-career teachers in rural schools.

Key words: early-career teacher, rural school, methodological support, psychological support, professional adaptation, pedagogical mentoring, professional deficits

For citation: Parshutina L.A., Yurchuk O.L., Gaidamashko I.V. Scientific-methodological and psychological support for the young rural school teacher in the process of digital transformation. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 191–196 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-191-196>

Введение/Introduction

Современная образовательная система Российской Федерации переживает период интенсивных трансформаций, особенно остро затрагивающих кадровое обеспечение сельских школ [1]. На фоне глобальной цифровизации образования и перехода к гибридным форматам обучения сельская школа, выступая центром социокультурной модернизации образования [2], сталкивается с уникальными вызовами в области привлечения и удержания молодых педагогических кадров.

Специфика профессиональной адаптации молодых учителей в сельских условиях определяется множественными факторами, среди которых территориальная изолированность, ограниченность материально-технических и методических ресурсов, повышенная социальная ответственность [3], а также растущий разрыв в уровне цифровых компетенций и доступе к современным образовательным технологиям между городскими и сельскими образовательными организациями. В этом контексте особую значимость приобретает разработка эффективных механизмов научно-методической и психологической поддержки начинающих педагогов, включая создание цифровой образовательной среды.

Психологическая готовность молодых учителей к профессиональной деятельности рассматривается исследователями как критический фактор успешной адаптации [4]. Профессиональное становление педагога представляет собой сложный процесс социализации и персонализации, направленный на формирование необходимых компетенций для эффективного разрешения профессиональных противоречий в современных условиях [5], которые усугубляются необходимостью быстрой адаптации к постоянно обновляющимся цифровым инструментам и платформам. Трансформация социальных установок молодых педагогов в процессе адаптации носит многофакторный характер [6], а профессионально-личностное становление учителей выступает ключевым фактором устойчивого развития региональных образовательных систем [7].

Анализ современных научных подходов к проблеме поддержки молодых педагогов выявляет необходимость внедрения инновационных социально-управленческих механизмов [8] и создания научно обоснованной концептуальной основы педагогической системы поддержки [9, 10], адекватной вызовам цифровой эпохи. Особое внимание требует кадровое обеспечение психолого-педагогического сопровождения, которое должно основываться на системном подходе [11].

Профессиональные дефициты молодых педагогов, особенно в сфере ИКТ-компетентности и работы в цифровой среде, представляют серьезные вызовы для образовательной системы [12], в то время как педагогическое наставничество признается ключевым механизмом профессиональной поддержки [13–15]. Это актуализирует

необходимость комплексного исследования эффективности различных форм поддержки, включая дистанционные и гибридные форматы наставничества, и разработки научно обоснованных рекомендаций по их совершенствованию.

Цели работы — выявить и проанализировать ключевые факторы, влияющие на профессиональную адаптацию молодых учителей в сельских школах, и разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию системы их психолого-методической поддержки.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование базируется на смешанной методологии, интегрирующей количественные и качественные исследовательские подходы. Методологическую основу составляет теория индивидуальных образовательных траекторий [1, 5], позволяющая рассматривать профессиональную адаптацию как персонализированный процесс профессионального становления.

Эмпирическое исследование проводили с сентября 2023 г. по декабрь 2024-го на базе сельских образовательных организаций пяти субъектов Российской Федерации: Новгородской, Свердловской, Томской областей, Алтайского края и Республики Татарстан.

Выборка исследования:

- основная группа — 35 молодых учителей сельских школ в возрасте от 22 до 28 лет (средний возраст $24,7 \pm 2,3$ года) со стажем педагогической деятельности от 6 месяцев до 3 лет;
- гендерное распределение — 28 женщин (80%) и 7 мужчин (20%);
- дополнительные участники — 12 учителей-наставников, 8 руководителей образовательных организаций, 6 специалистов методических служб.

Методы сбора данных:

1. Анкетирование (разработана специализированная анкета, включающая 45 вопросов закрытого и полужакрытого типа, направленных на оценку уровня профессиональной адаптации, качества методической и психологической поддержки, эффективности наставничества, выраженности профессиональных дефицитов. Валидность анкеты подтверждена экспертной оценкой (α Кронбаха = 0,82).

2. Психодиагностические методики (стандартизированные опросники для оценки психологической готовности к профессиональной деятельности и социальной адаптации).

3. Глубинные интервью (полуструктурированные интервью продолжительностью 45–60 минут с молодыми педагогами, наставниками и администрацией школ для выявления качественных характеристик адаптационного процесса).

Все показатели оценивались по 5-балльной шкале Лайкерта, где 1 балл соответствует минимальному значению показателя, 5 баллов —

максимальному. Оценка осуществлялась методом самооценки респондентов. Качество методической поддержки оценивали по трем критериям: доступность методических ресурсов, своевременность получения консультаций от методических служб, практическая применимость получаемых рекомендаций.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного пакета SPSS 26.0 (ПО IBM SPSS Statistics, США) и включала дескриптивную статистику (расчет средних значений, стандартных отклонений, медианы, минимальных и максимальных значений), корреляционный анализ Пирсона, множественный регрессионный анализ, сравнительный анализ с применением t-критерия Стьюдента. Уровень статистической значимости был установлен на $p < 0,05$.

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.

Оценку показателей осуществляли методом самооценки респондентов через специализированную анкету, качество методической поддержки оценивали по критериям доступности ресурсов, своевременности консультаций и практической применимости рекомендаций.

Наиболее высокие показатели зафиксированы в сфере эффективности наставничества ($M = 3,67 \pm 0,79$ балла), что свидетельствует о важности персонализированного подхода в системе профессиональной поддержки. Психологическая готовность молодых учителей находится на среднем уровне ($M = 3,45 \pm 0,87$ балла), при этом значительный диапазон значений (от 1,8 до 4,8 балла) указывает на необходимость дифференцированных подходов к психологическому сопровождению.

Качество методической поддержки демонстрирует наименьшие средние значения ($M = 3,12 \pm 0,95$ балла), что подчеркивает системные проблемы в организации методического обеспечения сельских школ. Профессиональные дефициты показывают средний уровень проблемности ($M = 2,89 \pm 0,82$ балла), что требует целенаправленной работы по их компенсации через систему дополнительного профессионального образования.

Корреляционный анализ по методу Пирсона (табл. 2) выявил сложную систему взаимосвязей между факторами профессиональной адаптации молодых учителей сельских школ. Анализировались

линейные связи между всеми измеренными показателями (по 5-балльной шкале).

Наиболее сильная положительная корреляция установлена между эффективностью наставничества и профессиональной адаптацией ($r = 0,71$, $p < 0,001$), что эмпирически подтверждает ключевую роль персонализированного педагогического сопровождения. Психологическая готовность демонстрирует значимые связи со всеми компонентами системы поддержки, особенно с профессиональной адаптацией ($r = 0,67$, $p < 0,001$). Обратные корреляции профессиональных дефицитов с показателями адаптации ($r = -0,63$, $p < 0,001$) и эффективностью наставничества ($r = -0,61$, $p < 0,001$) подтверждают компенсаторную функцию качественного профессионального сопровождения. Множественный регрессионный анализ показал, что эффективность наставничества ($\beta = 0,42$, $p < 0,001$), психологическая готовность ($\beta = 0,31$, $p < 0,01$) и качество методической поддержки ($\beta = 0,24$, $p < 0,05$) являются значимыми предикторами профессиональной адаптации. Модель объясняет 68% дисперсии ($R^2 = 0,68$, $F(3,31) = 22,14$, $p < 0,001$).

Распределение респондентов по уровням профессиональной адаптации выявляет критическую ситуацию в сфере профессионального становления молодых учителей сельских школ (табл. 3).

Таблица 1. Исходные данные по показателям профессиональной адаптации и системы сопровождения ($n = 35$)

Table 1. Initial data on indicators of professional adaptation and support system ($n = 35$)

Показатель	M	SD	Min	Max	Медиана
Уровень профессиональной адаптации	3,24	0,91	1,6	4,9	3,2
Психологическая готовность	3,45	0,87	1,8	4,8	3,4
Качество методической поддержки	3,12	0,95	1,4	4,7	3,1
Эффективность наставничества	3,67	0,79	2,1	4,9	3,7
Профессиональные дефициты	2,89	0,82	1,5	4,3	2,9
Социальная поддержка	3,38	0,74	1,9	4,6	3,4

Примечание: все показатели измерялись по 5-балльной шкале Лайкерта (1 — минимальное значение, 5 — максимальное значение).

Таблица 2. Корреляционная матрица основных показателей ($n = 35$)

Переменная	1	2	3	4	5	6
1. Профессиональная адаптация	1,00					
2. Психологическая готовность	0,67**	1,00				
3. Методическая поддержка	0,58**	0,52**	1,00			
4. Эффективность наставничества	0,71**	0,59**	0,64**	1,00		
5. Профессиональные дефициты	-0,63**	-0,48**	-0,55**	-0,61**	1,00	
6. Социальная поддержка	0,49**	0,41*	0,46**	0,53**	-0,44**	1,00

Примечание: ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Таблица 3. Распределение респондентов по уровню профессиональной адаптации

Table 3. Distribution of respondents by level of professional adaptation

Уровень	n	%	Адаптация к деятельности	Социальная адаптация	Организационная адаптация
Низкий (1,0–2,4)	6	17,1	2,1 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 0,4	2,2 $\pm$ 0,3
Средний (2,5–3,9)	19	54,3	3,2 $\pm$ 0,4	3,1 $\pm$ 0,5	3,3 $\pm$ 0,4
Высокий (4,0–5,0)	10	28,6	4,3 $\pm$ 0,3	4,2 $\pm$ 0,4	4,4 $\pm$ 0,3

Примечание: n — количество респондентов; показатели адаптации представлены по 5-балльной шкале ($M \pm SD$).

Общий уровень профессиональной адаптации рассчитывался как среднее значение трех компонентов: адаптации к деятельности, социальной и организационной адаптации.

Только 28,6% молодых педагогов достигают высокого уровня адаптации, что указывает на существенные резервы для оптимизации системы профессиональной поддержки. Средний уровень адаптации характерен для большинства респондентов (54,3%). Особую тревогу вызывает значительная доля педагогов с низким уровнем адаптации (17,1%), которые находятся в зоне профессионального риска.

Результаты качественного анализа (табл. 4) выявили системные проблемы, характерные для функционирования сельских образовательных организаций.

Полученные результаты подтверждают сложный, многофакторный характер процесса профессиональной адаптации молодых учителей в условиях сельской школы. Выявленная неоднородность адаптационных процессов требует дифференцированного подхода к организации профессиональной поддержки.

Ключевая роль наставничества в процессе адаптации соотносится с современными тенденциями развития педагогического образования [15] и подтверждает необходимость инвестиций в развитие института наставничества. Значимость психологической готовности актуализирует важность психологической подготовки будущих учителей на этапе профессионального образования [3].

Территориальная изолированность как ведущий барьер адаптации актуализирует развитие дистанционных форм поддержки и использование цифровых технологий. Профессиональные дефициты в области методической деятельности, особенно в использовании информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), отражают общие проблемы современного педагогического образования и требуют модернизации программ подготовки учителей.

Выводы/Conclusions

Проведенное исследование выявило многофакторный характер профессиональной адаптации молодых педагогов в условиях сельских школ. Установлено, что эффективность наставничества ($\beta = 0,42$, $p < 0,001$), психологическая готовность ($\beta = 0,31$, $p < 0,01$) и качество методической поддержки ($\beta = 0,24$, $p < 0,05$) выступают значимыми предикторами успешной адаптации, объясняя 68% дисперсии адаптационных процессов.

Корреляционный анализ продемонстрировал наличие сильной связи между эффективностью наставничества и уровнем профессиональной адаптации ($r = 0,71$, $p < 0,001$), что эмпирически подтверждает приоритетную роль персонализированного сопровождения. Выявлено,

Таблица 4. Основные трудности адаптации (качественный анализ, $n = 35$)

Table 4. Main difficulties of adaptation (qualitative analysis, $n = 35$)

Категория трудностей	Частота упоминаний	% респондентов
Территориальная изолированность	27	77,1
Многопрофильность деятельности	24	68,6
Недостаток методических ресурсов	22	62,9
Социальное давление	19	54,3
Ограниченность карьерных перспектив	18	51,4
Материально-технические проблемы	16	45,7

что высокого уровня адаптации достигают лишь 28,6% молодых учителей, тогда как 17,1% педагогов демонстрируют низкий уровень адаптации и нуждаются в усиленной профессиональной поддержке.

Качественный анализ идентифицировал ключевые барьеры адаптационного процесса: территориальную изолированность (77,1% респондентов), многопрофильность педагогической деятельности (68,6%) и дефицит методических ресурсов (62,9%). Наиболее выраженные профессиональные дефициты зафиксированы в области методической работы ($3,21 \pm 0,78$ балла), применения ИКТ ($3,67 \pm 0,89$ балла) и дифференциации обучения ($3,45 \pm 0,82$ балла).

Индивидуальное наставничество продемонстрировало максимальную эффективность ($4,12 \pm 0,68$ балла) при высокой доступности для участников исследования (91,4%). Позитивная динамика адаптации с приростом 0,54 балла за учебный год ($p < 0,001$) свидетельствует о наличии естественных адаптационных механизмов при условии обеспечения комплексной профессиональной поддержки.

Результаты исследования обосновывают необходимость:

1. расширения сети региональных центров наставничества с повышением их доступности для педагогов сельских школ;
2. внедрения дистанционных форм методической и психологической поддержки на основе цифровых образовательных платформ;
3. разработки индивидуализированных программ сопровождения с учетом специфических дефицитов каждого молодого педагога;
4. модернизации программ педагогического образования через усиление компонентов психологической готовности и ИКТ-компетенций.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой и апробацией инновационных цифровых технологий поддержки молодых учителей и изучением долгосрочных эффектов различных моделей профессионального сопровождения в условиях социокультурной модернизации сельской школы.

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. Kuznetsova Yu.A., Matveeva N.A., Veretennikova L.A., Zabneva E.I. Individual educational trajectory of a young teacher: the foundations of formation. *Ponte*. 2022; 78(1): 4. <https://doi.org/10.21506/j.ponte.2022.1.4>
2. 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>
3. Кажарская О.Н., Медведева С.А. Повышение уровня психологической готовности молодых учителей к профессионально-педагогической деятельности в условиях дополнительного профессионального образования. *Перспективы науки и образования*. 2024; (2): 713–733. <https://doi.org/10.32744/pse.2024.2.43>
4. Пермяков А.В., Петряков П.А., Ширин А.Г., Цывунина А.Д., Певзнер М.Н. Профессионально-личностное становление молодых педагогов как фактор устойчивого развития региона. *Science for Education Today*. 2024; 14(5): 158–180. <https://doi.org/10.15293/2658-6762.2405.08>
5. Проказина Н.В., Ланцев В.Л. Роль общественно-профессиональных объединений педагогов в условиях модернизации системы учительского роста. *Вестник Института социологии*. 2020; 11(2): 157–173. <https://doi.org/10.19181/vis.2020.11.2.651>
6. Проказина Н.В., Ланцев В.Л. Социально-управленческие механизмы внедрения профессионального стандарта педагога: особенности и перспективы. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Социология*. 2023; 23(3): 546–563. <https://doi.org/10.22363/2313-2272-2023-23-3-546-563>
7. Тумашева О.В., Шашкина М.Б. Педагогическая система поддержки и сопровождения работающих в школе студентов. *Образование и наука*. 2024; 26(5): 12–39. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2024-5-12-39>
8. Сартанова 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>
9. 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>
10. Тукфеева Ю.В., Кнышева Т.П., Трофимова А.П., Шарапова А.К., Курбанова В.В. Кадровое обеспечение психолого-педагогического сопровождения в системе общего образования и среднего профессионального образования. *Психолого-педагогические исследования*. 2025; 17(1): 81–99. <https://doi.org/10.17759/psyedu.2025170106>
11. Прямыкова Е.В., Шалагина Е.В., Шихова О.Н. Молодые педагоги между «Сциллой» и «Харибдой»: о профессиональных дефицитах в социологическом ракурсе (на примере Свердловской области). *Социологическая наука и социальная практика*. 2023; 11(4): 248–272. <https://doi.org/10.19181/snsp.2023.11.4.11>
12. 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>
13. Ostrovska M., Ostrovski O., Margitich K. Peculiarities of Professional Training of Future Teachers for Innovative Educational Activities in an Intercultural Environment. *Journal of Higher Education Theory and Practice*. 2023; 23(20): 65–75. <https://doi.org/10.33423/jhetp.v23i20.6688>
14. Мутигуллина А.А. Педагогическое наставничество в процессе адаптации молодых педагогов к профессиональной деятельности. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2024; 23(S1): 28–31. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-3653>
15. Сидоренко Г.Г., Халиева Р.А. Профессиональная адаптация молодых педагогов: виды и способы. *Мир науки. Педагогика и психология*. 2024; 12(3). <https://www.elibrary.ru/qjfsnu>

REFERENCES

1. Kuznetsova Yu.A., Matveeva N.A., Veretennikova L.A., Zabneva E.I. Individual educational trajectory of a young teacher: the foundations of formation. *Ponte*. 2022; 78(1): 4. <https://doi.org/10.21506/j.ponte.2022.1.4>
2. Sherayzina R.M., Alexandrova M.V., Eflova 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>
3. Kazharskaya O.N., Medvedeva S.A. Raising the young teachers' level of psychological readiness for professional and pedagogical activity in the conditions of supplementary professional education. *Perspectives of Science and Education*. 2024; (2): 713–733 (in Russian). <https://doi.org/10.32744/pse.2024.2.43>
4. Permyakov A.V., Petryakov P.A., Shirin A.G., Tsyvunina A.D., Pevzner M.N. Professional and personal development of newly-qualified teachers as a factor in sustainable development of the region. *Science for Education Today*. 2024; 14(5): 158–180 (in Russian). <https://doi.org/10.15293/2658-6762.2405.08>
5. Prokazina N.V., Lantsev V.L. The role of socio-professional teachers' unions in a situation when the education system is being modernized. *Bulletin of the Institute of Sociology*. 2020; 11(2): 157–173 (in Russian). <https://doi.org/10.19181/vis.2020.11.2.651>
6. Prokazina N.V., Lantsev V.L. Social-managerial mechanisms for the implementation of the teacher's professional standard: Features and prospects. *RUDN Journal of Sociology*. 2023; 23(3): 546–563 (in Russian). <https://doi.org/10.22363/2313-2272-2023-23-3-546-563>
7. Tumasheva O.V., Shashkina M.B. The pedagogical support system for students working at school. *The Education and science journal*. 2024; 26(5): 12–39 (in Russian). <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2024-5-12-39>
8. 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>
9. 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>
10. Tukfeeva Yu.V., Knyшева T.P., Trofimova A.P., Sharapova A.K., Kurbanova V.V. Staffing of psychological and pedagogical support in the system of general education and secondary vocational education. *Psychological-Educational Studies*. 2025; 17(1): 81–99 (in Russian). <https://doi.org/10.17759/psyedu.2025170106>
11. Pryamikova E.V., Shalagina E.V., Shikhova O.N. Young teachers caught between “Scylla” and “Charybdis”: professional deficits in a sociological perspective (case of Sverdlovsk region). *Sociological Science and Social Practice*. 2023; 11(4): 248–272 (in Russian). <https://doi.org/10.19181/snsp.2023.11.4.11>
12. 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>
13. Ostrovska M., Ostrovski O., Margitich K. Peculiarities of Professional Training of Future Teachers for Innovative Educational Activities in an Intercultural Environment. *Journal of Higher Education Theory and Practice*. 2023; 23(20): 65–75. <https://doi.org/10.33423/jhetp.v23i20.6688>
14. Mutigullina A.A. Pedagogical mentoring in the process of adaptation of young teachers to professional activities. *Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2024; 23(S1): 28–31 (in Russian). <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-3653>
15. Sidorenko G.G., Khalieva R.A. Professional adaptation of young teachers: types and methods. *World of Science. Pedagogy and Psychology*. 2024; 12(3) (in Russian). <https://www.elibrary.ru/qjfsnu>

ОБ АВТОРАХ

Людмила Александровна Паршутина¹

кандидат педагогических наук, заместитель директора, заведующая лабораторией психологических основ дидактики и методики преподавания
parshutinala@mail.ru

Ольга Леонидовна Юрчук²

кандидат психологических наук, заместитель руководителя Федерального координационного центра по развитию психолого-педагогической помощи в системе образования Российской Федерации
yurchukol@mgppu.ru

Игорь Вячеславович Гайдамашко¹

доктор психологических наук, академик РАО, главный заместитель директора
igor660@mail.ru

¹Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований,
ул. Моховая, 9, стр. 4, Москва, 125009, Россия

²Московский государственный психолого-педагогический университет,
ул. Сретенка, 29, Москва, 127051, 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

Olga Leonidovna Yurchuk²

Candidate of Psychological Sciences, Deputy Head of the Federal Coordination Center for the Development of Psychological and Pedagogical Assistance in the Education System of the Russian Federation
yurchukol@mgppu.ru

Igor Vyacheslavovich Gaidamashko¹

Doctor of Psychological Sciences, Academician of the Russian Academy of Education, Chief Deputy Director
igor660@mail.ru

¹Federal Scientific Center for Psychological and Interdisciplinary Research,
9/4 Mokhovaya Str., Moscow, 125009, Russia

²Moscow State University of Psychology and Education,
29 Sretenka Str., Moscow, 127051, Russia

ПРОДУКТЫ

ИННОВАЦИИ

УСЛУГИ

ЛОГИСТИКА

МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ B2B
ВЫСТАВКА

**GLOBAL FRESH
MARKET:
VEGETABLES
& FRUITS**

**11-13 НОЯБРЯ 2025**

Гостиный Двор, Москва

Контакты



+7 (495) 481-29-19



business@gfmexpo.com



www.gfmexpo.com

РЕКЛАМА

Соорганизатор
национальный
ПЛОДОВООЩНОЙ СОЮЗ

При поддержке



**Global Fresh
MARKET**

Полный цикл производства «от поля до прилавка» на единой площадке

Прямой диалог с ключевыми игроками рынка

Обширная деловая программа с участием экспертов мирового уровня:

110+приглашенных
спикеров**30**отраслевых мероприятий
по овощеводству и садоводству

Конкурс студенческих работ для молодых специалистов в АПК



УДК 638.5:559.27

Краткое сообщение



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202

А.В. Введенская ✉

М.Н. Глубокова

Самарский государственный
медицинский университет
Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Самара,
Россия

✉ wasily10@mail.ru

Поступила в редакцию: 25.08.2025

Одобрена после рецензирования: 14.07.2025

Принята к публикации: 29.07.2025

© Введенская А.В., Глубокова М.Н.

Short communications



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202

Anna V. Vvedenskaya ✉

Maria N. Glubokova

Samara State Medical University of the
Ministry of Health Russian Federation,
Samara, Russia

✉ wasily10@mail.ru

Received by the editorial office: 25.08.2025

Accepted in revised: 14.07.2025

Accepted for publication: 29.07.2025

© Vvedenskaya A.V., Glubokova M.N.

Цифровой двойник и предиктивное управление синтезом диизопропилового эфира в виброожиженном слое

РЕЗЮМЕ

Представлена концепция использования ферментов семейства поли(АДФ-рибоза) полимераз (ПАРП) как инновационных биомаркеров для оценки репродуктивного потенциала петухов-производителей в промышленном птицеводстве. Разработана методология комплексного анализа активности ПАРП-1, ПАРП-2 и ПАРП-9 в сперматозоидах с целью повышения эффективности селекционного отбора. Экспериментально установлено, что концентрация интактных форм полимераз коррелирует с морфофункциональными характеристиками половых клеток ($r = 0,73-0,81$), тогда как уровень расщепленных форм обратно связан с жизнеспособностью сперматозоидов. Исследованы 248 петухов породы род-айланд в период 2023–2024 гг., показано превышение активности ПАРП в высококачественных образцах спермы на 60–62% по сравнению с низкокачественными. Разработана прогностическая модель с объяснительной способностью $R^2 = 0,71$, позволяющая прогнозировать фертильный потенциал производителей с точностью 87%. Внедрение ПАРП-диагностики обеспечивает повышение точности селекционного отбора на 23–27%, снижение непродуктивных затрат на содержание низкокачественных самцов и ускорение создания конкурентоспособных отечественных линий птицы. Экономическая эффективность составляет 18,5 тыс. руб/га дополнительного дохода при окупаемости инвестиций 4,2 года.

Ключевые слова: цифровой двойник, предиктивное управление, виброожиженный слой, диизопропиловый эфир, каталитический синтез

Для цитирования: Введенская А.В., Глубокова М.Н. Цифровой двойник и предиктивное управление синтезом диизопропилового эфира в виброожиженном слое. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 197–202.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202>

Digital twin and predictive control of diisopropyl ether synthesis in a vibrofluidized bed

ABSTRACT

The concept of using enzymes from the poly(ADP-ribose) polymerase (PARP) family as innovative biomarkers for assessing the reproductive potential of breeder roosters in industrial poultry farming is presented. A methodology for the comprehensive analysis of PARP-1, PARP-2, and PARP-9 activity in spermatozoa has been developed to enhance the efficiency of breeding selection. It has been experimentally established that the concentration of intact forms of the polymerases correlates with the morphofunctional characteristics of germ cells ($r = 0.73-0.81$), while the level of cleaved forms is inversely related to sperm viability. A study of 248 Rhode Island Red roosters during 2023–2024 showed that PARP activity in high-quality semen samples was 60–62% higher compared to low-quality samples. A predictive model with an explanatory power of $R^2 = 0.71$ was developed, allowing for the prediction of the fertile potential of breeders with an accuracy of 87%. The implementation of PARP-based diagnostics ensures a 23–27% increase in the accuracy of breeding selection, a reduction in unproductive costs associated with maintaining low-quality males, and an acceleration in the development of competitive domestic poultry lines. The economic efficiency amounts to 18.5 thousand RUB/ha of additional income with a return on investment of 4.2 years.

Key words: digital twin, predictive control, vibrofluidized bed, diisopropyl ether, catalytic synthesis

For citation: Vvedenskaya A.V., Glubokova M.N. Digital twin and predictive control of diisopropyl ether synthesis in a vibrofluidized bed. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 197–202 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202>

Введение/Introduction

Современная химическая промышленность стоит на пороге фундаментальной трансформации, обусловленной четвертой промышленной революцией, или Индустрией 4.0 [1]. Переход от традиционных, зачастую эмпирических методов управления технологическими процессами к цифровым, интеллектуальным системам является ключевым фактором повышения конкурентоспособности, экономической эффективности и экологической безопасности производств [2–5].

Процессы каталитического синтеза органических соединений, таких как диизопропиловый эфир (ДИПЭ), характеризуются сложной, многофакторной кинетикой, высокой чувствительностью к незначительным флуктуациям параметров и постепенной деградацией каталитической активности используемых материалов [6]. Традиционные подходы к управлению, основанные на регламентных значениях и периодическом контроле, не позволяют достичь максимальной эффективности, поскольку не способны в реальном времени адаптироваться к стохастическим изменениям внутри реакционной зоны и на поверхности катализатора [7]. Это приводит к снижению селективности целевого продукта, увеличению выхода побочных продуктов, нерациональному расходу сырья и энергии, а также к сокращению межрегенерационного пробега катализатора [8].

Внедрение цифровых инструментов, таких как киберфизические системы, предиктивная аналитика на основе машинного обучения и концепция «цифрового двойника», открывает принципиально новые возможности для оптимизации сложных химико-технологических систем. Создание высокоточной виртуальной модели процесса, способной в реальном времени обрабатывать данные с множества датчиков и предсказывать развитие событий на несколько шагов вперед, позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению [9]. Для процессов, реализуемых в условиях высоких скоростей и малых времен контакта, как, например, в технологии аэрозольного нанокатализа в виброожигенном слое, такой подход становится не просто желательным, а критически необходимым [10].

Научная проблема, решаемая в данном исследовании, заключается в разработке и апробации интегрированной цифровой платформы для управления процессом синтеза ДИПЭ из изопропилового спирта, которая бы учитывала нелинейные зависимости между параметрами, динамику состояния катализатора и позволяла бы в автоматическом режиме поддерживать процесс в точке глобального оптимума по ключевым показателям эффективности.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В качестве методологической основы исследования была выбрана концепция создания

киберфизической системы, интегрирующей физическую лабораторную установку и ее многоуровневый цифровой двойник.

Физический компонент представляет собой лабораторный реактор с виброожигенным слоем катализатора, работающий по технологии AnCVB (Aerosol Nanoparticle Catalysis in Vibrofluidized Bed, разработка ООО «Научно-технический центр «Синтез», Россия). Реактор оснащен комплексом датчиков для непрерывного мониторинга ключевых параметров: температуры в различных точках реакционной зоны (термопары типа K, модель ДТПК-035, производитель ЗАО «Термоприбор», Россия), давления (датчики давления серии Сапфир-22М, АО «ОВЕН», Россия), частоты и амплитуды механических колебаний (акселерометры модели AP2037-050, компания PCB Piezotronics, США), а также расхода исходного сырья (масс-расходомеры серии EL-FLOW, производитель Bronkhorst High-Tech B.V., Нидерланды). Анализ состава продуктовой смеси осуществлялся в режиме онлайн с помощью потокового газового хроматографа Кристалл 5000.2 (АО «Мета-Хром», Россия) с пламенно-ионизационным детектором, что обеспечивало получение данных о конверсии и селективности с дискретностью в 60 секунд.

В качестве каталитических систем использовались исходный цеолит типа NaX и его модифицированная форма с повышенной кислотностью, полученная обработкой нитратом аммония [11].

Цифровой двойник был реализован как многокомпонентная программная система на базе платформы Python 3.9 (Python Software Foundation, США) с использованием библиотек TensorFlow 2.8 (Google LLC, США) для реализации рекуррентных нейронных сетей и XGBoost 1.5 (DMLC, открытое ПО) для градиентного бустинга.

Первый уровень – это детерминированная модель, основанная на фундаментальных уравнениях химической кинетики, тепло- и массопереноса, описывающая идеализированное течение процесса в соответствии с моделью идеального вытеснения с учетом внешнEDIффузионных ограничений.

Второй уровень — стохастическая модель на основе машинного обучения, построенная с использованием ансамбля алгоритмов градиентного бустинга и рекуррентных нейронных сетей с архитектурой LSTM (Long Short-Term Memory) [12].

Эта модель обучалась на массиве экспериментальных данных объемом 250 часов непрерывной работы установки, полученных в ходе предварительных серий опытов при варьировании температуры (120–180°C), расхода сырья (0,5–2,5 мл/мин) и частоты вибрации (20–50 Гц), и была предназначена для коррекции предсказаний детерминированной модели, учитывая неучтенные факторы и случайные отклонения.

Удельное энергопотребление определялось как отношение суммарной электрической мощности системы нагрева реактора и вибропривода

к массе полученного целевого продукта. Изменение потребляемой мощности осуществлялось непрерывно с помощью цифрового ваттметра ЦП8506-1 (АО «МНИПИ», Россия, класс точности 0,5) с интервалом регистрации 1 минута. Погрешность определения удельного энергопотребления составляла $\pm 3,5\%$.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного пакета STATISTICA 13.3 (правообладатель TIBCO Software Inc., США) и пакета scikit-learn 1.0 (открытое ПО) в среде Python.

Применялись методы дескриптивной статистики, множественного регрессионного анализа и анализа главных компонент (PCA). Оценка точности прогностических моделей осуществлялась с использованием метрик среднеквадратичной ошибки (RMSE), средней абсолютной ошибки (MAE) и коэффициента детерминации (R^2). Для валидации моделей использовался метод кросс-валидации с разделением данных в соотношении 80:20 (обучающая и тестовая выборки).

Статистическая значимость различий между режимами управления оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В ходе экспериментальных исследований было проведено сравнительное изучение эффективности двух режимов управления процессом каталитического синтеза диизопропилового эфира: традиционного регламентного и цифрового предиктивного управления с использованием разработанного цифрового двойника. Эксперименты выполнялись на модифицированном цеолитном катализаторе типа NaX при идентичных начальных условиях. Продолжительность каждой серии составляла 120 часов непрерывной работы реактора.

Сравнительный анализ проводился по трем ключевым показателям: селективность по целевому продукту (ДИПэ), общая конверсия изопропилового спирта (ИПС) и удельное энергопотребление на килограмм полученного продукта. Селективность и конверсия определялись методом газовой хроматографии с использованием внутреннего стандарта (н-декан, чистота 99,5%, Sigma-Aldrich, США). Погрешность определения составляла $\pm 0,8\%$ для селективности и $\pm 1,2\%$ для конверсии. Удельное энергопотребление рассчитывалось как отношение суммарной электрической мощности системы

нагрева реактора и вибропривода (измеренной с помощью цифрового ваттметра ЦП8506-1, АО «МНИПИ», Россия, класс точности 0,5) к массе полученного целевого продукта.

Погрешность определения удельного энергопотребления составляла $\pm 3,5\%$. Результаты сравнительных экспериментов представлены в таблице 1.

Статистический анализ с использованием t-критерия Стьюдента показал, что различия между режимами управления являются статистически значимыми ($p < 0,01$) по всем исследуемым параметрам. Средняя селективность по целевому продукту при использовании цифрового предиктивного управления возросла на 17,62%, конверсия исходного сырья увеличилась на 18,87%, при этом удельное энергопотребление снизилось на 22,61%. Анализ протоколов управляющих воздействий показал, что цифровая система осуществляла превентивную коррекцию температурного режима на 2–3°C при прогнозировании снижения селективности, компенсируя уменьшение скорости реакции увеличением расхода сырья на 5–8%. Частота корректирующих воздействий составляла в среднем $8,3 \pm 2,1$ раз в час, тогда как при традиционном управлении параметры поддерживались постоянными в течение всего цикла работы. Для оценки зависимости точности прогнозирования цифрового двойника от объема обучающей выборки были проведены серии экспериментов с различной длительностью предварительного накопления данных. Точность модели оценивалась по метрикам среднеквадратичной ошибки (RMSE) для прогноза селективности и коэффициента детерминации (R^2) для прогноза конверсии.

Результаты представлены в таблице 2.

Установлено, что наиболее существенный прирост точности прогнозирования наблюдается при увеличении объема выборки с 20 до 100 часов непрерывной работы: RMSE снижается с 4,18% до 1,12% (в 3,73 раза), R^2 возрастает с 0,86 до 0,97. Дальнейшее увеличение объема

Таблица 2. Зависимость точности прогнозирования цифрового двойника от объема обучающей выборки

Table 2. Dependence of the accuracy of digital twin forecasting on the size of the training sample

Объем обучающей выборки (часы непрерывной работы)	Среднеквадратичная ошибка (RMSE) прогноза селективности, %	Коэффициент детерминации (R^2) прогноза конверсии
20	4,18	0,86
50	2,05	0,93
100	1,12	0,97
200	1,09	0,98

Таблица 1. Сравнительные показатели эффективности процесса синтеза ДИПэ при различных режимах управления
Table 1. Comparative indicators of the efficiency of the synthesis process of DIPE under different control modes

Показатель	Традиционное управление	Цифровое предиктивное управление	Относительное улучшение, %
Средняя селективность по ДИПэ, %	$72,4 \pm 0,8$	$85,2 \pm 0,8$	+17,62
Средняя конверсия ИПС, %	$65,8 \pm 1,2$	$78,3 \pm 1,2$	+18,87
Удельное энергопотребление, кВт·ч/кг	$1,10 \pm 0,04$	$0,90 \pm 0,03$	-22,61

данных до 200 часов приводит к незначительному улучшению показателей ($\Delta RMSE = 0,03\%$, $\Delta R^2 = 0,01$), что свидетельствует о достижении плато насыщения модели.

Математическая обработка экспериментальных данных методом анализа главных компонент (PCA) показала, что 85,3% дисперсии целевых показателей (селективности и конверсии) объясняется тремя главными компонентами. Первая главная компонента (объясняет 52,7% дисперсии) включает температуру реакционной зоны и ее производную по времени; вторая компонента (23,1% дисперсии) — расход сырья и частоту вибрации; третья компонента (9,5% дисперсии) — нелинейные взаимодействия между параметрами процесса.

Полученные результаты демонстрируют существенное превосходство цифрового предиктивного управления над традиционным регламентным подходом. Ключевой проблемой традиционного управления каталитическим синтезом является невозможность учета динамических изменений состояния каталитической системы. Оператор поддерживает заданные регламентные значения температуры и расхода, которые представляют собой усредненный оптимум, полученный в лабораторных условиях. Однако в реальном процессе состояние каталитической системы постоянно изменяется: происходит постепенное коксование и деактивация активных центров, флуктуирует состав сырья, возникают локальные перегревы или зоны с недостаточной турбулизацией потока [13].

Эти факторы приводят к тому, что заранее заданный режим перестает быть оптимальным, что ведет к снижению эффективности производства. Особенно остро эта проблема проявляется при использовании высокоактивных, но нестабильных каталитических систем, где скорость деградации сопоставима со скоростью полезной реакции.

Внедрение цифровой системы управления, основанной на предиктивной модели, позволяет решить эту проблему путем непрерывной адаптации процесса к его текущему состоянию. Вместо поддержания статичных параметров система динамически изменяет управляющие воздействия для поддержания оптимального состояния процесса.

Рост средней селективности на 17,62% является критически важным показателем, напрямую влияющим на экономику производства за счет снижения затрат на последующую очистку и разделение продуктов реакции. Столь значительный прирост объясняется способностью системы в реальном времени корректировать температурный режим, избегая зон, где начинают доминировать побочные реакции, такие как дегидратация ИПС до пропилена.

Одновременный рост конверсии исходного сырья на 18,87% свидетельствует о более полном использовании реакционного объема и потенциала катализатора. Цифровая система не допускала работы в режимах с низкой эффективностью,

постоянно удерживая процесс в области оптимальных параметров.

Снижение удельного энергопотребления на 22,61% достигается за счет синергии нескольких факторов. Во-первых, система избегала избыточного перегрева, который является основной статьей энергозатрат. Во-вторых, за счет повышения общей эффективности (конверсии и селективности) на производство единицы продукции требовалось меньше времени и ресурсов. Таким образом, цифровизация не только повышает технологические показатели, но и вносит прямой вклад в повышение энергоэффективности и устойчивости производства.

Анализ зависимости точности модели от объема обучающей выборки (табл. 2) показывает, что модель, обученная на 100-часовом наборе данных, способна объяснить 97% дисперсии реальной конверсии, что является высоким показателем для сложного химического процесса. Такой скачок в точности объясняется тем, что за 100 часов работы система успевает зафиксировать достаточное разнообразие режимов, включая переходные процессы и начальные стадии деактивации катализатора [7].

Выход на плато насыщения при увеличении объема данных со 100 до 200 часов свидетельствует о том, что модель уже извлекла практически всю полезную информацию из доступного типа данных. Для дальнейшего повышения точности потребовалось бы не просто увеличение объема, а введение новых типов данных, например, с помощью более совершенных аналитических инструментов (*in situ* спектроскопия). Полученные результаты позволяют сделать важный практический вывод: для внедрения подобной цифровой системы на производстве требуется этап предварительной эксплуатации в режиме сбора данных продолжительностью около 100 часов для достижения оптимального баланса между точностью модели и временем на ее калибровку.

Результаты PCA-анализа показывают, что определяющими факторами процесса являются не просто абсолютные значения температуры или расхода, а их сложные нелинейные комбинации, а также производные по времени, отражающие динамику процесса. Например, ключевое влияние оказывает не абсолютное значение температуры, а скорость ее изменения в ответ на изменение активности катализатора [2].

Традиционные системы управления не способны отслеживать и контролировать такие комплексные производные параметры. Цифровая система, напротив, оперирует именно в этом пространстве латентных факторов, что и обеспечивает ее высокую эффективность.

Дальнейшее развитие подобных систем связано с переходом к полностью автономным производствам. Это требует решения ряда сложных задач, включая разработку самообучающихся моделей, способных адаптироваться к изменению

сырья или модернизации оборудования без необходимости полного переобучения. Также актуальной является задача интеграции экономических моделей в контур управления, чтобы система могла оптимизировать процесс не только по технологическим, но и по финансово-экономическим критериям в реальном времени, учитывая текущие цены на сырье, энергию и готовую продукцию. Использование технологий, подобных аэрозольному нанокатализу, в сочетании с интеллектуальными системами управления открывает путь к созданию компактных, гибких и высокоэффективных химических модулей, способных быстро перестраиваться под нужды рынка.

Перспективы применения данного подхода выходят далеко за рамки синтеза ДИПэ. Разработанная методология может быть адаптирована для широкого круга каталитических процессов в нефтехимии, тонком органическом синтезе и фармацевтике. Фундаментальный принцип — создание самокорректирующегося цифрового двойника, управляющего физическим объектом — является универсальным. Это знаменует собой парадигмальный сдвиг в инженерной практике — от проектирования статичных процессов к созданию динамических, самооптимизирующихся производственных систем [13], способных работать на пике своей теоретической эффективности в течение всего жизненного цикла.

Выводы/Conclusions

Проведенное исследование демонстрирует качественное превосходство цифрового предик-

тивного управления над традиционным регламентным подходом для сложного процесса синтеза диизопропилового эфира. Внедрение многоуровневого цифрового двойника, объединившего фундаментальную модель и алгоритмы машинного обучения, позволило добиться существенного улучшения ключевых показателей: селективность выросла на 17,6%, конверсия сырья — на 18,9%, а удельное энергопотребление снизилось на 22,6%. Это доказывает, что адаптивная система, в отличие от статической, способна эффективно компенсировать такие динамические факторы, как деградация катализатора и флуктуации в реакторе.

Были установлены практические рамки для внедрения подобных систем. Наибольший прирост точности прогнозирующей модели наблюдается при накоплении данных за примерно 100 часов непрерывной работы, после чего эффективность обучения выходит на плато. Это означает, что для развертывания технологии на производстве необходим первоначальный этап сбора данных в течение этого времени для калибровки модели и достижения оптимальной точности.

В итоге работа подтверждает, что переход к проактивному управлению на основе цифрового двойника открывает новые возможности для химической технологии. Такой подход не просто автоматизирует, а интеллектуально оптимизирует процесс в реальном времени, учитывая сложные нелинейные взаимосвязи и динамику параметров. Это ведет к синергетическому эффекту: одновременному росту производительности, экономии ресурсов и повышению экологической безопасности.

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.

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Saha P., Bruning H., Wagner T.V., Rijnaarts H.H.M. Removal of organic compounds from cooling tower blowdown by electrochemical oxidation: Role of electrodes and operational parameters. *Chemosphere*. 2020; 259: 127491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127491>
2. Huang Y.-H., Shih Y.-J., Liu C.-H. Oxalic acid mineralization by electrochemical oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 188(1–3): 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.091>
3. Макиева А. Цифровая трансформация управления жизненным циклом наукоемкой продукции. *Стандарты и качество*. 2025; (5): 10–11. <https://elibrary.ru/nfzses>
4. Дедова В.Д., Дедов К.Д. Новые технологии как фактор экономического развития предприятий в условиях современных вызовов. *Инженерная экономика и технологическое предпринимательство: технологическое лидерство и стратегия инжинирингового прорыва: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции учащейся молодежи*. Донецк: Донецкий национальный технический университет. 2024; 102–103. <https://elibrary.ru/wiqvna>
5. Гаврилова Т.В. Цифровизация производства. *Интеграция и совершенствование цифровой среды социально-экономического пространства в условиях многополярного мира*. М.: Образовательная автономная некоммерческая организация высшего образования «Институт образовательных технологий и гуманитарных наук». 2024; 70–76. <https://elibrary.ru/vbxirg>

REFERENCES

1. Saha P., Bruning H., Wagner T.V., Rijnaarts H.H.M. Removal of organic compounds from cooling tower blowdown by electrochemical oxidation: Role of electrodes and operational parameters. *Chemosphere*. 2020; 259: 127491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127491>
2. Huang Y.-H., Shih Y.-J., Liu C.-H. Oxalic acid mineralization by electrochemical oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 188(1–3): 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.091>
3. Makieva A. Digital transformation of life cycle management of knowledge-intensive products. *Standards and quality*. 2025; (5): 10–11 (in Russian). <https://elibrary.ru/nfzses>
4. Dedova V.D., Dedov K.D. New technologies as a factor in economic development of enterprises in the face of modern challenges. *Engineering economics and technological entrepreneurship: technological leadership and strategy of an engineering breakthrough: Collection of materials from the All-Russian scientific and practical conference of student youth*. Donetsk: Donetsk National Technical University. 2024; 102–103 (in Russian). <https://elibrary.ru/wiqvna>
5. Gavrilova T.V. Digitalization of production. *Integration and improvement of the digital environment of the socio-economic space in a multipolar world*. Moscow: Educational Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education "Institute of Educational Technologies and Humanities". 2024; 70–76 (in Russian). <https://elibrary.ru/vbxirg>

6. Usov P.M., Fabian C., D'alessandro D.M. Rapid determination of the optical and redox properties of a metal-organic framework *via in situ* solid state spectroelectrochemistry. *Chemical Communications*. 2012; 48(33): 3945–3947.
<https://doi.org/10.1039/C2CC30568B>

7. Seebach D. Preparation of Enantiomerically Pure Compounds Employing Anodic Oxidations of Carboxylic Acids — A Late Review of Research Done in the 1980ies. *Helvetica Chimica Acta*. 2019; 102(6): e1900072.
<https://doi.org/10.1002/hlca.201900072>

8. Özcan A.A., Özcan A. Investigation of applicability of Electro-Fenton method for the mineralization of naphthol blue black in water. *Chemosphere*. 2018; 202: 618–625.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.125>

9. Steter J.R., Barros W.R.P., Lanza M.R.V., Motheo A.J. Electrochemical and sonoelectrochemical processes applied to amaranth dye degradation. *Chemosphere*. 2014; 117: 200–207.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.085>

10. Shimakoshi H. Application of bioorganometallic B₁₂ in green organic synthesis. Litwack G. (ed.). *Vitamin B₁₂*. Academic Press. 2022; 23–42.
<https://doi.org/10.1016/bs.vh.2022.01.015>

11. Wang H. *et al.* Kinetics and energy efficiency for the degradation of 1,4-dioxane by electro-peroxone process. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 294: 90–98.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.058>

12. Watanabe M., Maeda I., Koyama M., Nakamura K., Sasano K. Simultaneous recovery and purification of rice protein and phosphorus compounds from full-fat and defatted rice bran with organic solvent-free process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2015; 119(2): 206–211.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.07.009>

13. Luo M., Yuan S., Tong M., Liao P., Xie W., Xu X. An integrated catalyst of Pd supported on magnetic Fe₃O₄ nanoparticles: Simultaneous production of H₂O₂ and Fe²⁺ for efficient electro-Fenton degradation of organic contaminants. *Water Research*. 2014; 48: 190–199.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.029>

ОБ АВТОРАХ

Анна Васильевна Введенская

Исследователь
 wasily10@mail.ru

Мария Николаевна Глубокова

кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры общей, бионеорганической и биорганической химии
 glubokova@mail.ru

¹Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Чапаевская, 89, Самара, 443099, Россия

6. Usov P.M., Fabian C., D'alessandro D.M. Rapid determination of the optical and redox properties of a metal-organic framework *via in situ* solid state spectroelectrochemistry. *Chemical Communications*. 2012; 48(33): 3945–3947.
<https://doi.org/10.1039/C2CC30568B>

7. Seebach D. Preparation of Enantiomerically Pure Compounds Employing Anodic Oxidations of Carboxylic Acids — A Late Review of Research Done in the 1980ies. *Helvetica Chimica Acta*. 2019; 102(6): e1900072.
<https://doi.org/10.1002/hlca.201900072>

8. Özcan A.A., Özcan A. Investigation of applicability of Electro-Fenton method for the mineralization of naphthol blue black in water. *Chemosphere*. 2018; 202: 618–625.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.125>

9. Steter J.R., Barros W.R.P., Lanza M.R.V., Motheo A.J. Electrochemical and sonoelectrochemical processes applied to amaranth dye degradation. *Chemosphere*. 2014; 117: 200–207.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.085>

10. Shimakoshi H. Application of bioorganometallic B₁₂ in green organic synthesis. Litwack G. (ed.). *Vitamin B₁₂*. Academic Press. 2022; 23–42.
<https://doi.org/10.1016/bs.vh.2022.01.015>

11. Wang H. *et al.* Kinetics and energy efficiency for the degradation of 1,4-dioxane by electro-peroxone process. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 294: 90–98.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.058>

12. Watanabe M., Maeda I., Koyama M., Nakamura K., Sasano K. Simultaneous recovery and purification of rice protein and phosphorus compounds from full-fat and defatted rice bran with organic solvent-free process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2015; 119(2): 206–211.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.07.009>

13. Luo M., Yuan S., Tong M., Liao P., Xie W., Xu X. An integrated catalyst of Pd supported on magnetic Fe₃O₄ nanoparticles: Simultaneous production of H₂O₂ and Fe²⁺ for efficient electro-Fenton degradation of organic contaminants. *Water Research*. 2014; 48: 190–199.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.029>

ABOUT THE AUTHORS

Anna Vasilyevna Vvedenskaya

Researcher
 wasily10@mail.ru

Maria Nikolaevna Glubokova

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of General, Bioinorganic and Bioorganic Chemistry
 glubokova@mail.ru

¹Samara State Medical University of the Ministry of Health Russian Federation, 89 Chapayevskaya Str., Samara, 443099, Russia

Новости из ЦНСХБ

Обзор подготовлен Тимофеевской С. А.

Повышение воспроизводительных качеств свиноматок и продуктивности их потомства путем включения в рационы биологически активных веществ : монография / Н. А. Злепкина, И. А. Авоян, В. В. Саломатин, А. А. Ряднов, Х. Б. Баймишев. — Волгоград : ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2023. — 112 с. Шифр ЦНСХБ 24-5287.

В монографии представлены результаты многолетних комплексных исследований по использованию ферментно-пробиотического препарата «Бацелл» отдельно и совместно с природным бишофитом в рационах супоросных и лактирующих свиноматок и их потомства. Дана краткая характеристика пробиотиков, обобщены литературные данные о биологической роли природных минеральных добавок и пробиотиков в повышении продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы. Собственные исследования посвящены изучению влияния ферментно-пробиотического препарата «Бацелл» отдельно и в сочетании с природным бишофитом Волгоградского месторождения на воспроизводительные качества свиноматок и оценке их последствий на продуктивность полученного потомства. Для оценки воспроизводительных качеств свиноматок анализировали размер гнезда, крупноплодность, молочность, количество поросят при отъеме, общую живую массу гнезда при отъеме, изменения среднесуточного прироста поросят в подсосный период. В экспериментах по влиянию препарата «Бацелл» и бишофита на мясную продуктивность молодняка изучали динамику живой массы и интенсивность роста поросят, линейный рост, клинико-физиологические показатели, морфологические и биохимические параметры крови молодняка. Анализировали убойный выход, морфологический состав туш, толщину шпига, площадь мышечного глазка, химический состав и биологическую ценность мышечной ткани, кулинарно-технологические свойства и органолептические показатели свинины. Рассчитана экономическая эффективность использования препарата «Бацелл» отдельно и в сочетании с бишофитом в рационах молодняка свиней. Книга содержит 3 приложения, 28 таблиц и

библиографический список из 200 отечественных и иностранных источников. Предназначена для научных работников, зооветеринарных специалистов АПК, преподавателей, аспирантов и студентов высших и средних специальных учебных заведений сельскохозяйственного профиля.

Хозяйственно-биологические особенности птицы кросса Ross 308 при скормливании биологически активных добавок и пробиотиков : монография / И. А. Скоркина, С. А. Ламонов, Д. В. Машталер, Е. В. Савенкова. — Мичуринск : Изд-во Мичуринского ГАУ, 2024. — 107 с. Шифр ЦНСХБ 24-5346.

В монографии рассмотрено влияние биологически активных веществ и пробиотиков на продуктивные качества кур родительского стада и цыплят-бройлеров мясного кросса Росс 308. В литературном обзоре приведена краткая характеристика препаратов лимонника китайского и элеутерококка колючего и пробиотиков «Субтилис» и «Бацелл». Обобщены результаты исследований различных ученых о влиянии данных растительных препаратов и пробиотиков на продуктивность сельскохозяйственных животных и птицы. Собственные исследования проведены на курах кросса Росс 308. Изучали влияние добавления к основному рациону кур родительского стада растительных биостимуляторов (лимонник, элеутерококк) и пробиотиков («Субтилис» и «Бацелл») на яйценоскость и выход инкубационных яиц, пригодных к инкубации, морфологические и биохимические показатели инкубационных яиц, оплодотворенность, выводимость яиц и вывод молодняка. Подробно рассмотрены вопросы роста и развития цыплят-бройлеров кросса Росс 308 при включении в рацион БАД и пробиотиков. Проанализированы динамика изменения массы головного мозга и желез внутренней секреции, развития внутренних органов, морфологических и биохимических показателей крови в период опыта. Особое внимание уделено переваримости и использованию питательных веществ комбикорма при скормливании БАД и

пробиотиков. Изучено влияние данных препаратов на сохранность цыплят-бройлеров и затраты корма. Проведена дегустационная оценка качества мяса цыплят-бройлеров. Доказано, что использование в рационах мясных кур препаратов лимонника китайского и элеутерококка, а также пробиотиков «Субтилис» и «Бацелл» позволит отказаться от кормовых антибиотиков, повысить естественную резистентность и продуктивность птицы, получить экологически безопасную продукцию. Книга содержит 6 приложений 19 иллюстраций, 30 таблиц и список использованной отечественной и иностранной литературы из 110 источников. Предназначена для научных работников, специалистов системы АПК, преподавателей, аспирантов и студентов сельскохозяйственных вузов.

Эффективность производства баранины в курдючном овцеводстве : монография / В. И. Косилов, Е. А. Никонова, А. М. Давлетова, Б. Б. Траисов, О. А. Быкова. — Екатеринбург : Издательский дом «Ажур», 2024. 176 с. Шифр ЦНСХБ 24-6124.

В монографии изложены результаты разработки путей рационального использования генетических ресурсов овец курдючного направления продуктивности. Кратко представлено развитие и современное состояние овцеводства Западного Казахстана. Приведены литературные данные о факторах, влияющих на мясную продуктивность овец, и результаты собственных исследований по изучению особенностей формирования мясной продуктивности молодняка овец казахской курдючной грубошерстной породы. В сравнительном аспекте изучены рост и развитие баранчиков, валушков и ярок. Проанализированы возрастная динамика гематологических показателей, размеров тела, живой массы и интенсивность роста. Изучены убойные показатели, морфологический состав туш, химический состав, биологическая ценность и калорийность мяса, особенности биоконверсии питательных веществ и энергии корма в мясную продукцию. Рассчитана экономическая эффективность выращивания молодняка овец. Приведены результаты эксперимента по изучению влияния подбора по живой массе и классу шерсти на продуктивные качества овец эдильбаевской породы в ТОО «Племзавод «Брлик» Западно-Казахстанской области. Дана характеристика стада эдильбаевских овец, представлены показатели продуктивности баранов и овцематок, используемых в подборе. Изучены племенные и хозяйственно-биологические особенности молодняка, полученного при подборе родительских пар

по живой массе и классу шерсти. Рассмотрены рост и развитие, нагульные и убойные качества баранчиков в возрасте 4-4,5 месяцев, шерстная продуктивность, выживаемость молодняка, племенные качества ярок, селекционно-генетические параметры продуктивности подопытного молодняка. Представлена экономическая эффективность реализации на мясо баранчиков, полученных от различных вариантов подбора. Книга содержит 8 иллюстраций, 60 таблиц и библиографический список из 235 отечественных и иностранных источников. Предназначена для специалистов животноводства, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов аграрных вузов.

Беляков М.В. Применение оптического излучения для диагностики и обработки инкубационных яиц : монография / Беляков М.В. — Смоленск: Универсум, 2014. — 160 с. Шифр ЦНСХБ 24-4357.

Монография посвящена вопросам оптической диагностики и стимуляции инкубационных яиц сельскохозяйственной птицы. Изучены спектральные свойства яиц сельскохозяйственной птицы для разработки методик и средств контроля инкубации в условиях крупных птицефабрик и небольших частных хозяйств. Для диагностики использовали отражательный метод и метод люминесцентного анализа в ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Для стимуляции применялось излучение электродуговых гелиевых плазматронов и коротковолновых светодиодов. Описано строение и химический состав яиц, основные пигменты яичной скорлупы, приведены оптические характеристики отражения яиц. Представлены приборы и методы неразрушающего оптического контроля инкубационных яиц, обнаружения дефектов яиц, оплодотворенности, эмбрионального развития и сроков хранения. Изучены оптические и люминесцентные свойства яиц различных видов сельскохозяйственной птицы. Исследована связь характеристик и параметров фотолюминесценции яиц с результатами инкубации. Уделено внимание актуальному вопросу разработки оптических методов раннего определения пола будущих цыплят. Представлены результаты инкубации после обработки яиц оптическим излучением (плазматроны, светодиоды, лазеры). Книга содержит большое количество иллюстраций, таблиц и библиографический список из 95 источников отечественной и иностранной литературы. Предназначена для специалистов в области птицеводства, научных работников, аспирантов, преподавателей и студентов аграрных вузов.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
КОРМОВ, КОРМОВЫХ ДОБАВОК, ВЕТЕРИНАРИИ И ОБОРУДОВАНИЯ

КормВет экспо Грэйнд 2025

29–31 ОКТЯБРЯ, МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

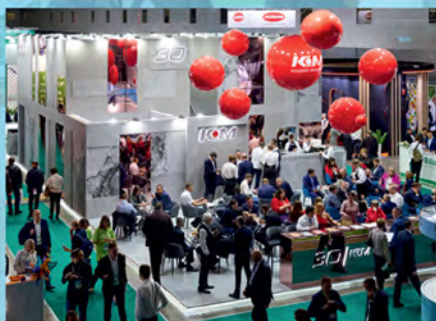
свиноводство | птицеводство | животноводство | аквакультура

ПРОВОДИТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ И УЧАСТИИ



- КОРМА, КОМБИКОРМА, КОРМОВЫЕ ДОБАВКИ
- ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМБИКОРМОВ, ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА И МАСЛИЧНЫХ
- ТЕХНОЛОГИИ ПОЛЕВОГО КОРМОПРОИЗВОДСТВА
- СИСТЕМЫ КОРМЛЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ
- ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОРМОВ

- ВЕТЕРИНАРНЫЕ ПРЕПАРАТЫ
- ВАКЦИНЫ, СЫВОРОТКИ
- ИММУНОГЛОБУЛИНЫ
- ВИТАМИННО-МИНЕРАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ
- ВЕТЕРИНАРНЫЙ И ЗООТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ
- СРЕДСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ



НАС ВЫБИРАЮТ ПРОФЕССИОНАЛЫ!



16+



ТЕЛ.: +7 (499) 649-50-20
E-MAIL: INFO@FEEDVET-EXPO.RU

FEEDVET-EXPO.RU

ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ: ООО "ДЕКАРТС СИСТЕМ"
119049, г. МОСКВА, ЛЕНИНСКИЙ ПРОСПЕКТ, 2/2А, ОФИС 326