

НАРОЖНЫХ КИРИЛЛ НИКОЛАЕВИЧ

Генетические и биохимические закономерности аккумуляции тяжелых металлов у крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири

4.2.5 – Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных
4.2.4 – Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Новосибирск 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ)

Научный консультант: доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ **Петухов Валерий Лаврентьевич**, доктор биологических наук, профессор **Короткевич Ольга Сергеевна**

Официальные оппоненты: **Абилов Ахмед Имаш оглы**, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории клеточной инженерии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста».
Иолчиев Байлар Садратдин оглы, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории воспроизведения сельскохозяйственных животных Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела»
Кульмакова Наталия Ивановна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры ветеринарной медицины Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2025 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 35.2.025.03, созданного на базе ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ по адресу: 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ и на сайте <http://edubiotech.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук,
доцент

Маренков Владимир Григорьевич

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение продовольственной безопасности, повышение продуктивности сельскохозяйственных животных и гарантия качества продукции являются стратегическими приоритетами АПК (Амерханов, 2024; Двалишвили, Мильчевский, 2022; Донник и др., 2023; Зиновьева и др., 2020; Котарев, Иванова, 2021; Магер, Солошенко, 2024; Солошенко и др., 2023). Ключевым фактором является элементный статус животных, формируемый под влиянием средовых, кормовых, физиологических и генетических факторов (Афанасьева, Сарычев, 2024; Васильев и др., 2023; Косилов и др., 2024; Лебедева и др., 2024; Максимов и др., 2020; Некрасов и др., 2024; Сермягин и др., 2023; Чабаев и др., 2024; Юлдашбаев и др., 2023а, 2024а). Особую актуальность приобретает проблема контаминации окружающей среды и кормов тяжелыми металлами (ТМ), нарушающими метаболизм, снижающими продуктивность и представляющими опасность для здоровья человека (Абилов, Ескин, 2016; Багиров и др., 2018; Коцаев и др., 2024; Miroshnikov и др., 2021). Западная Сибирь, как важный аграрный регион с разнообразными природно-климатическими условиями и техногенной нагрузкой, требует изучения региональных закономерностей миграции и накопления химических элементов в системе «почва – вода – корм – животное» (Солошенко, Машанов, 2011). Несмотря на значительный объем исследований, ряд вопросов (органо- и тканеспецифичность аккумуляции ТМ, межвидовые и межпородные особенности, влияние эколого-географических факторов, методы прижизненной оценки и прогнозирования) остаются недостаточно изученными. Разработка новых подходов к мониторингу и управлению минеральным питанием животных с учетом региональных, породных и индивидуальных особенностей необходима для совершенствования технологий животноводства и обеспечения безопасности продукции (Абилов и др., 2022; Калашников и др., 2022; Мирошников, 2021; Петухов и др., 2023).

Степень разработанности темы. Проблема обеспечения продовольственной безопасности и производства безопасной продукции животноводства является предметом многочисленных исследований (Абилов и др., 2023; Донник и др., 2023; Дунин и др., 2024; Донченко и др., 2023; Дускаев, 2024; Зайцев и др., 2022; Иолчиев и др., 2024; Коцаев и др., 2022). Вопросы мониторинга ТМ традиционно находятся в фокусе внимания ветеринарных специалистов и зоотехников. Изучено влияние рационов, условий содержания и экологии на накопление ТМ (Мирошников и др., 2023; Племяшов и др., 2022; Юлдашбаев и др., 2023б, 2024б). Однако комплексные исследования, охватывающие органо- и тканеспецифичные закономерности аккумуляции,

сравнительный анализ пород и видов, оценку влияния генетических факторов и разработку прогностических моделей на основе легкодоступных биоматериалов с использованием современных многомерных статистических методов, в условиях Западной Сибири проводились в недостаточном объеме. Отсутствие детализированных данных по региональным особенностям, породно- и видоспецифичным референтным интервалам затрудняет точную диагностику и нормирование содержания тяжелых металлов. Актуальность и необходимость проведения данных исследований подтверждается их поддержкой в рамках гранта Российского научного фонда № 22-76-00003 и госбюджетной тематики № 1023030200009-4-4.2.1.

Цель исследования. Установить генетические и биохимические закономерности аккумуляции и распределения тяжелых металлов в организме крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири и разработать научно обоснованные подходы к оценке и прогнозированию их содержания для получения экологически безопасной продукции.

Задачи исследования:

1. Выполнить комплексную зоотехническую оценку племенного стада герефордской породы (продуктивные и племенные качества, анализ качественной и возрастной структуры стада, генетическое разнообразие, наследуемость гематологических признаков).
2. Изучить закономерности аккумуляции и распределения тяжелых металлов в органах и тканях крупного рогатого скота.
3. Оценить влияние эколого-географических условий юга Западной Сибири на уровень накопления эссенциальных и токсичных микроэлементов в органах и тканях крупного рогатого скота и разработать региональные референтные интервалы содержания железа и марганца.
4. Выявить межпородные различия в аккумуляции цинка в органах крупного рогатого скота мясного и молочного направлений продуктивности, определить породно-специфичные референтные интервалы.
5. Провести сравнительный анализ соотношений тяжелых металлов (Cd/Zn, Cu/Zn, Fe/Mn, Pb/Cd) в органах и тканях крупного рогатого скота герефордской и черно-пестрой пород.
6. Оценить влияние генотипа быков-производителей голштинской породы на концентрацию цинка в мышечной ткани потомков.
7. Разработать и обосновать региональные, породно- и видоспецифические референтные интервалы содержания эссенциальных химических элементов (Fe, Mn, Zn) в органах и мышечной ткани сельскохозяйственных животных.

8. Разработать и апробировать регрессионные модели для прижизненного неинвазивного прогнозирования содержания эссенциальных (Fe, Mn, Zn) и токсичного (Cd) элементов в мышечной ткани крупного рогатого скота герефордской породы на основе гематологических и биохимических показателей крови.

Научная новизна исследований. Выявлены существенные межпородные различия в аккумуляции Zn, соотношениях ТМ (Fe/Mn, Cu/Zn, Cd/Zn) и в корреляционных структурах между крупным рогатым скотом мясного (геррефордская) и молочного (черно-пестрая, голштинская) направлений продуктивности. Впервые для крупного рогатого скота геррефордской породы установлены детальные закономерности органо- и тканеспецифичной аккумуляции ТМ (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd) с использованием многомерных статистических методов, выявлены оси вариабельности и сформированы кластеры органов. Оценено генетическое разнообразие (по STR-локусам) племенного стада геррефордского скота в условиях Западной Сибири, установлена наследуемость адаптивно значимых гематологических показателей. Экспериментально доказано значимое влияние генотипа отцов голштинской породы на концентрацию Zn в мышечной ткани потомков. Установлены межвидовые различия (крупный рогатый скот, свиньи, овцы) в содержании Zn в мышечной ткани. Впервые разработаны и обоснованы региональные, породно- и видоспецифические референтные интервалы содержания Fe, Mn, Zn. Разработан и валидирован комплекс регрессионных моделей для прижизненного неинвазивного прогнозирования содержания ТМ в мышечной ткани крупного рогатого скота по показателям крови.

Теоретическая и практическая значимость. Исследование направлено на развитие фундаментальных знаний в области элементологии, экологической и физиологической генетики сельскохозяйственных животных, расширяя теоретические представления о закономерностях аккумуляции ТМ и их молекулярно-генетических механизмах, включая генетическую обусловленность минерального обмена, а также биологические и хозяйственные особенности животных. Теоретически обоснована важность анализа элементных соотношений и корреляций как индикаторов метаболического статуса. Обоснованы и экспериментально подтверждены новые методологические подходы к комплексной оценке элементного статуса животных и прогнозированию содержания микроэлементов в продукции.

Практическая значимость заключается в разработке научно обоснованных инструментов для мониторинга и управления минеральным питанием и безопасностью продукции животноводства. Выявленные закономерности органо- и тканеспецифичности ТМ могут использоваться для оптимизации

мониторинга контаминации. Доказанные межпородные и межвидовые различия служат основой для разработки дифференцированных, научно обоснованных норм кормления. Установленное влияние генотипа отцов на концентрацию Zn обосновывает перспективы селекции на качество мяса. Разработанные референтные интервалы являются готовым инструментом для диагностики и контроля уровня ТМ в органах и тканях крупного рогатого скота. Предложенные регрессионные модели предоставляют новый метод прижизненной неинвазивной оценки элементного статуса и прогнозирования качества мяса.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели реализован комплексный, междисциплинарный подход, сочетающий методы мониторинга, аналитической химии (атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная спектрометрия), зоотехнии (оценка племенных и продуктивных качеств), методы лабораторной диагностики (гематологические и биохимические исследования крови), генетики (микросателлитный анализ) и статистического анализа данных (многомерные статистические методы – метод главных компонент, кластерный анализ; регрессионный анализ с кросс-валидацией).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Племенное стадо герефордской породы, разводимое в условиях Западной Сибири, характеризуется высоким генетическим потенциалом, продуктивностью, адаптивностью и достаточным уровнем генетического разнообразия, а оценка наследуемости гематологических показателей открывает перспективы для селекции на адаптивность.

2. Аккумуляция тяжелых металлов (Cd, Cu, Fe, Mn) в организме крупного рогатого скота герефордской породы носит органо- и тканеспецифичный характер.

3. Влияние эколого-географических условий юга Западной Сибири на содержание большинства эссенциальных микроэлементов в органах герефордов ограничено, но выявлена региональная специфика аккумуляции цинка; установлены региональные референтные интервалы для Fe и Mn.

4. Существуют выраженные межпородные различия в аккумуляции цинка в органах крупного рогатого скота мясного (герефордская порода) и молочного (черно-пестрая порода) направлений; установлены породно-специфические референтные интервалы для Zn.

5. Выявлены существенные межпородные различия в соотношениях ТМ (Fe/Mn, Cu/Zn, Cd/Zn) и корреляций у крупного рогатого скота герефордской и черно-пестрой пород.

6. Концентрация цинка в мышечной ткани овец значительно ниже, чем у крупного рогатого скота и свиней; разработаны видоспецифические референтные интервалы содержания Zn.

7. Генотип отцов голштинской породы оказывает статистически значимое влияние на концентрацию цинка в мышечной ткани потомков, обосновывая перспективы генетической селекции на качество мяса.

8. Разработан и валидирован комплекс регрессионных моделей для прижизненного неинвазивного прогнозирования содержания Fe, Mn, Zn, Cd в мышечной ткани крупного рогатого скота герефордской породы по показателям крови.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность обеспечивается объемом экспериментального материала (более 50 тыс. измерений), репрезентативными выборками, использованием современных аттестованных методов и оборудования, применением статистических методов, включая многомерный анализ и кросс-валидацию моделей. Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на научных конференциях и симпозиумах различного уровня (Национальные: «Теория и практика современной аграрной науки», Новосибирск, 2019, 2024; «Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий», Новосибирск, 2020, 2021, 2023; Международные: «Пища. Экология. Качество», Москва-Барнаул, 2019; Екатеринбург-Москва, 2020; «Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике», Каменново, 2022; «Развитие биотехнологии: новая реальность», Новосибирск, 2022; «Digital Technologies in Agriculture...», Ставрополь, 2022; Ежегодное собрание Немецкого общества минералов и микроэлементов (GMS), 2021; «AGROSYM 2023», Яхорина, Босния и Герцеговина, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 работ, в том числе 18 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и приравненных к ним, 1 патент на изобретение и 3 свидетельства на базы данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 431 страницах машинописного текста, содержит 69 таблиц и 44 рисунка. Состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов исследований, результатов исследований, обсуждения результатов исследований, заключения, предложений, перспективы дальнейшей разработки темы, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 775 источника и приложений.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в период с 2018 по 2025 гг. на базе животноводческих предприятий Алтайского края, Новосибирской и Кемеровской областей. Схема проведения исследований представлена на рисунке 1. Объектами исследования, на примере которых изучались закономерности аккумуляции тяжелых металлов, являлись крупный рогатый скот (n=313), свиньи (n=45) и овцы (n=30), содержащиеся в условиях, соответствующих типовым требованиям промышленных комплексов. Кормление осуществлялось сбалансированными рационами согласно действующим нормам.

Отбор биологического материала (мышечная ткань, печень, почки, селезенка, сердце, легкие, семенники) проводили после убоя клинически здоровых животных. Дополнительно у крупного рогатого скота отбирали образцы волоса и крови. Анализировались данные по содержанию тяжелых металлов в почве, воде и кормах исследуемых регионов. Общий объем выполненных зоотехнических, физико-химических, гематологических, биохимических и молекулярно-генетических измерений превысил 50 тысяч.

Определение содержания химических элементов (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd) в биосубстратах проводили методами атомно-абсорбционной спектрометрии (с пламенной и электротермической атомизацией, коррекцией фона по эффекту Зеемана на приборах Shimadzu AA-7000, МГА-1000) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (IRIS Advantage). Пробоподготовка образцов проводилась методами мокрого озоления (ткани) и микроволнового разложения (волос) с использованием стандартных образцов для калибровки.

Гематологические показатели (эритроциты, лейкоциты, гемоглобин, СОЭ) определяли на автоматическом анализаторе (PCE-90VET) и стандартными методами. Биохимические показатели крови (общий белок, альбумин, глобулин, мочевины, мочевая кислота, общий холестерин, железо) определяли фотометрическими методами на полуавтоматическом анализаторе (Photometer-5010) с использованием коммерческих наборов реактивов. Рассчитывали цветовой показатель крови. Оценка роста и развития проводилась путем анализа данных индивидуального взвешивания и бонитировок (с использованием ИАС «Селэкс: Мясной скот»).

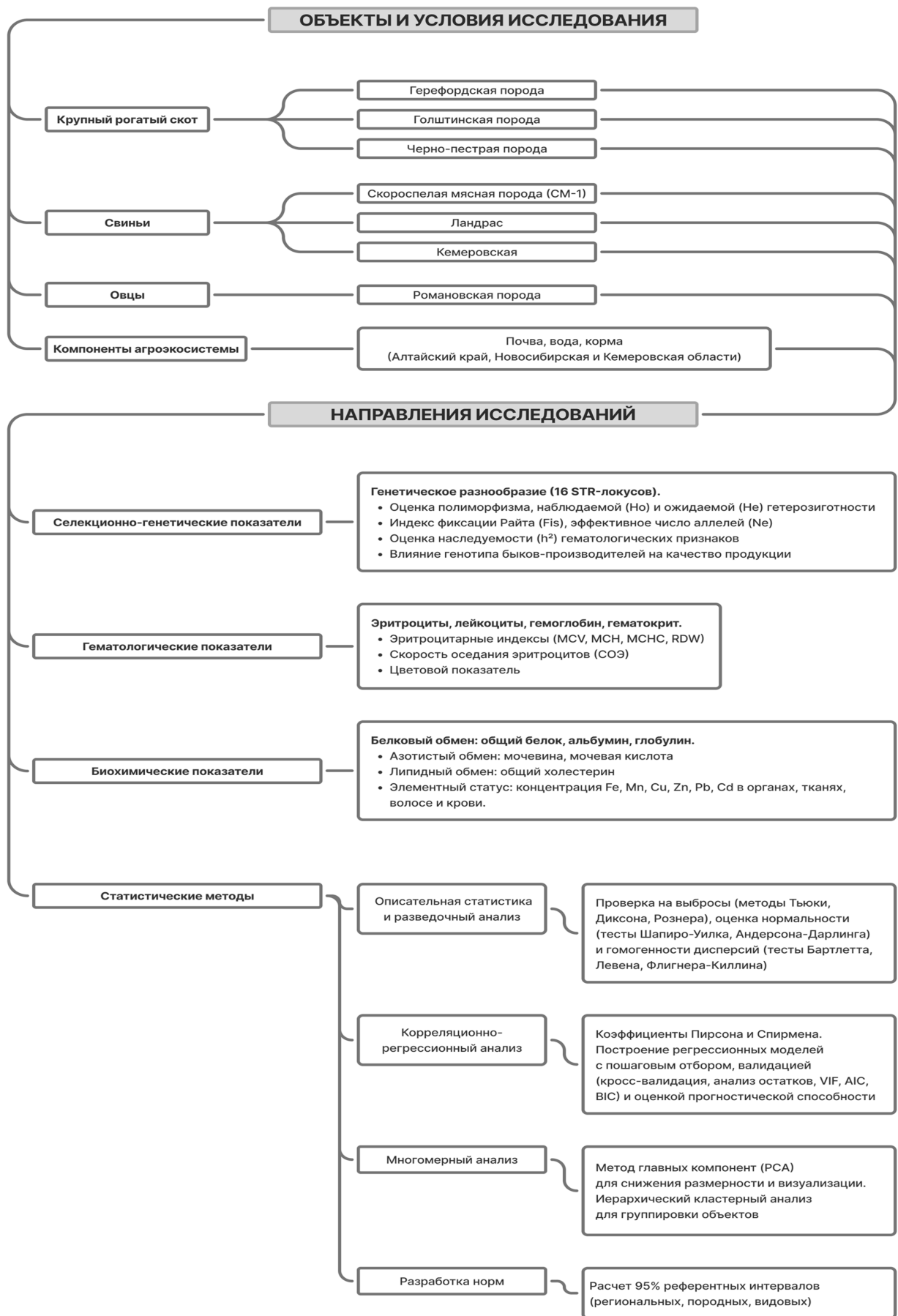


Рисунок 1 – Схема исследования

Молекулярно-генетические исследования (для оценки генетического разнообразия герефордского скота, n=217) включали выделение ДНК из крови, мультиплексную ПЦР для амплификации 16 микросателлитных локусов (рекомендованных ISAG/FAO и дополнительных), капиллярный электрофорез (Нанофор 05) и генотипирование (GeneMarker).

Статистический анализ данных проводился в среде R с использованием современных подходов. Выполнялся разведочный анализ данных (выявление выбросов, проверка нормальности распределения тестами Шапиро-Уилка/Андерсона-Дарлинга, оценка гомогенности дисперсий тестами Фишера/Бартлетта/Левена/Флигнера-Килина). Применялись робастные методы оценки среднего и стандартного отклонения при ненормальном распределении. Для сравнения групп использовались параметрические (t-критерий Стьюдента/Уэлча, дисперсионный анализ) и непараметрические (U-критерий Манна-Уитни, критерий Краскела-Уоллиса) методы, а также апостериорные тесты (Тьюки и Данна) с поправкой Холма на множественные сравнения. Корреляционный анализ проводился с использованием коэффициентов Пирсона и Спирмена. Для снижения размерности и визуализации данных применялся метод главных компонент (РСА), для группировки объектов – иерархический кластерный анализ (с выбором оптимальной метрики и метода кластеризации по кофенетической корреляции). Регрессионные модели строились с использованием пошагового отбора, анализа всех подмножеств, оценки по информационным критериям Акаике (AIC) и Байеса (BIC), скорректированному коэффициенту детерминации (R^2_{adj}), статистике Ср Мэллоу. Проводилась проверка мультиколлинеарности (оценка фактора инфляции дисперсии, VIF), анализ остатков (на соответствие нормальному распределению, гомоскедастичность, независимость, наличие влиятельных наблюдений по дистанции Кука) и оценка прогностической способности моделей с помощью кросс-валидации (r×k-fold CV). Референтные интервалы рассчитывались уточненным бутстрэп-перцентильным методом. Уровень статистической значимости принимался при $p \leq 0,05$.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Мониторинг тяжелых металлов в системе "почва-вода-корм" в условиях Западной Сибири

Проведен комплексный эколого-биогеохимический анализ данных по содержанию тяжелых металлов (Mn, Zn, Cu, Fe, Pb, Cd) в компонентах агроэкосистем Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края,

полученных в Институте почвоведения и агрохимии СО РАН и опубликованных совместно с А.И. Сысо (Narozhnykh и др., 2018, 2024). Установлено, что валовое содержание исследованных ТМ (Mn: 59,0-963; Zn: 0,57-86; Cu: 0,36-36,9; Pb: 1,38-18; Cd: 0,035-0,49 мг/кг) в почвах сельскохозяйственных угодий изученных районов не превышает установленных ПДК/ОДК, свидетельствуя об отсутствии значительного техногенного загрязнения почв валовыми формами. Содержание подвижных форм Mn, Zn, Cu было значительно ниже валового, но варьировало в зависимости от района, отражая почвенно-геохимические условия. Почвы Алтайского края характеризовались наиболее низким содержанием ТМ, с потенциальным дефицитом Zn и Cu.

Анализ поверхностных и подземных вод Новосибирской области, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, показал, что концентрации Fe, Mn, Pb, Cu, Zn во всех исследованных районах не превышали ПДК, что характеризует качество воды как удовлетворительное.

Средние концентрации Fe достигали 241,1 мг/кг (сенаж, Кемеровская обл.) и даже до 786 мг/кг (сено костра, Кемеровская обл.) при МДУ 100 мг/кг. Содержание других ТМ (Mn, Zn, Cu, Pb) в кормах находилось в пределах МДУ. Однако уровень кадмия (Cd) в отдельных видах кормов из Кемеровской области (сено костра, сенаж однолетних трав) приближался к МДУ (0,3 мг/кг) или потенциально превышал его, что также является фактором риска. Концентрации ТМ в зерне, выращенном в Новосибирской области, существенных превышений не показали.

3.2 Комплексная оценка продуктивных качеств, генетических особенностей и физиологических показателей герефордского скота в условиях юга Западной Сибири

Герефордская порода является одной из ведущих мясных пород, играющих важную роль в обеспечении продовольственной безопасности. В условиях Западной Сибири оценка ее адаптационного потенциала и продуктивных качеств имеет особое значение. Проведена всесторонняя оценка племенного стада герефордской породы, разводимого в условиях круглогодичного пастбищного содержания в Новосибирской области. Установлено, что стадо характеризуется высоким уровнем консолидации и продуктивности.

Анализ динамики классного состава стада за 2020–2022 гг. показал эффективность селекционно-племенной работы: отмечен неуклонный рост доли животных класса элита-рекорд и элита во всех половозрастных группах. Доля коров класса элита-рекорд увеличилась с 33,5% до 49,4%, а доля элитных быков-производителей возросла почти в три раза (с 13 до 39 голов). Возрастная

структура основного стада оптимальна: доля коров старше 8 лет не превышает 17%, основной состав быков-производителей приходится на наиболее продуктивный возраст 3–5 лет, что свидетельствует о своевременном обновлении поголовья и рациональном использовании генофонда.

Оценка продуктивных качеств показала высокие показатели живой массы, соответствующие классу элита-рекорд (свыше 570 кг для более 80% коров), и положительную динамику увеличения живой массы коров с возрастом на фоне сохранения хороших мясных форм, характерных для породы, и высокой скорости роста. Высота в крестце стабильна (133–138 см у взрослых коров) и соответствует стандарту породы. Средняя продолжительность межотельного периода находится в пределах физиологической нормы (361–365 дней). Молочность коров, оцененная по живой массе телят в 205-дневном возрасте, превышает требования класса элита-рекорд и имеет тенденцию к увеличению (средняя масса бычков от первотелок выросла с 235 кг в 2021 г. до 252 кг в 2022 г.), что характеризует хозяйственно-биологические особенности породы.

Анализ полиморфизма 16 микросателлитных локусов ($n=217$ коров) позволил оценить селекционно-генетические параметры и изучить генетическое разнообразие. Выявлен достаточный уровень генетического разнообразия: среднее число аллелей (N_a) – 4,75 (общее число 76), эффективное число аллелей (N_e) – 3,51, средняя наблюдаемая гетерозиготность (H_o) – 0,72. Отрицательное значение индекса фиксации Райта ($F_{is} = -0,05$) указывает на отсутствие выраженного инбридинга. Несмотря на выявленные отклонения от равновесия Харди-Вайнберга по ряду локусов, генетическая структура стада в целом демонстрирует достаточную устойчивость и уровень разнообразия, что позволяет поддерживать адаптационный потенциал и вести дальнейшую селекцию.

Исследование биологических и хозяйственно-полезных качеств включало сравнительный анализ гематологических показателей двух смежных поколений (матери, $n=66$ и дочери, $n=66$). У телок достоверно выше количество эритроцитов, гемоглобина, гематокрита и лейкоцитов, но ниже MCV и MCH. Установлены коэффициенты наследуемости (h^2) для ряда показателей эритроцитарного ростка ($RBC=0,31$; $HGB=0,30$; $MCHC=0,46$; $RDW=0,34$) и среднего объема тромбоцитов ($MPV=0,34$), что открывает возможность использования этих селекционно-генетических параметров при отборе животных по адаптивному потенциалу.

Полученные оценки коэффициентов наследуемости указывают на существенный вклад генетических факторов в изменчивость данных признаков и открывают перспективы для их использования в селекции. Однако, учитывая сложность оценки наследуемости физиологических признаков, эти результаты

требуют дальнейшего подтверждения и уточнения, возможно, с использованием более сложных моделей анализа.

3.3 Органо- и тканеспецифичные закономерности аккумуляции и распределения тяжелых металлов в органах и тканях герефордского скота

Изучение особенностей накопления тяжелых металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd) в организме крупного рогатого скота герефордской породы выявило выраженную тканеспецифичность и дискретный характер их распределения. Установлено, что кадмий (Cd) преимущественно аккумулируется в почках, где его концентрация многократно превышает содержание в других исследованных органах, что обусловлено связыванием с металлотионеинами и медленной элиминацией. Медь (Cu) демонстрирует выраженную тропность к печени, ее концентрация в данном органе на порядок выше, чем в других тканях, что может быть связано с ключевой ролью печени в метаболизме и депонировании этого элемента. Основным депо железа (Fe) является селезенка, участвующая в его рециркуляции в процессе гемопозза.

В отличие от Cd, Cu и Fe, распределение свинца (Pb) и цинка (Zn) в организме носит более равномерный характер. Однако для этих металлов отмечена различная фенотипическая изменчивость в зависимости от органа. Вариабельность концентрации Pb в почках и сердце была в 2-6 раз ниже, чем в других образцах; аналогичная тенденция к снижению вариабельности (в 2 и более раз) наблюдалась для Zn в селезенке и сердце. Распределение марганца (Mn) имело промежуточный характер: его концентрация и изменчивость были выше в печени, но различия с другими органами были менее выражены.

Для выявления комплексных взаимосвязей и паттернов накопления ТМ был применен метод главных компонент. Установлено, что первые две главные компоненты (ГК) объясняют 57,87% общей изменчивости в распределении шести исследованных металлов между семью органами/тканями. Анализ факторных нагрузок и корреляций показал, что ГК1 (36,90% дисперсии) отражает общую контаминацию организма (вклад Mn, Cu, Zn, Pb) и интенсивность метаболических процессов, а ГК2 (20,97% дисперсии) – специфику накопления в органах со специализированными функциями, противопоставляя селезенку (депо Fe, Pb; низкий Cd) и почки (депо Cd; низкие Fe, Pb), что подтверждается отрицательной корреляцией (-0,517) между Cd и Fe по ГК2 (таблица 1).

Таблица 1 – Доля интерпретируемой изменчивости уровней тяжелых металла в органах и тканях мясного скота, %

Признак	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	ГК5
Fe	0,01	45,15	20,76	16,93	17,15
Mn	34,2	1,37	5,26	6,65	3,28
Cu	34,83	2,34	1,09	3,61	9,17
Zn	17,69	2,7	14,68	63,19	1,27
Pb	12,72	27,23	0,22	2,47	56,57
Cd	0,55	21,21	57,98	7,15	12,56

Визуализация распределения органов и тканей в пространстве первых двух ГК (рисунок 2) показала формирование четких кластеров. Печень, как орган с максимальным содержанием Cu, Mn и Fe, образует отдельный, удаленный кластер. Почки, накапливающие наибольшее количество Cd, также формируют обособленный кластер. Селезенка, с высокой аккумуляцией Fe и Pb, занимает противоположное почкам положение относительно оси ГК2. Легкие, семенники и сердце группируются вместе, демонстрируя сходный характер накопления ТМ. Мышечная ткань располагается в центральной части диаграммы, отражая среднюю нагрузку ТМ на организм.

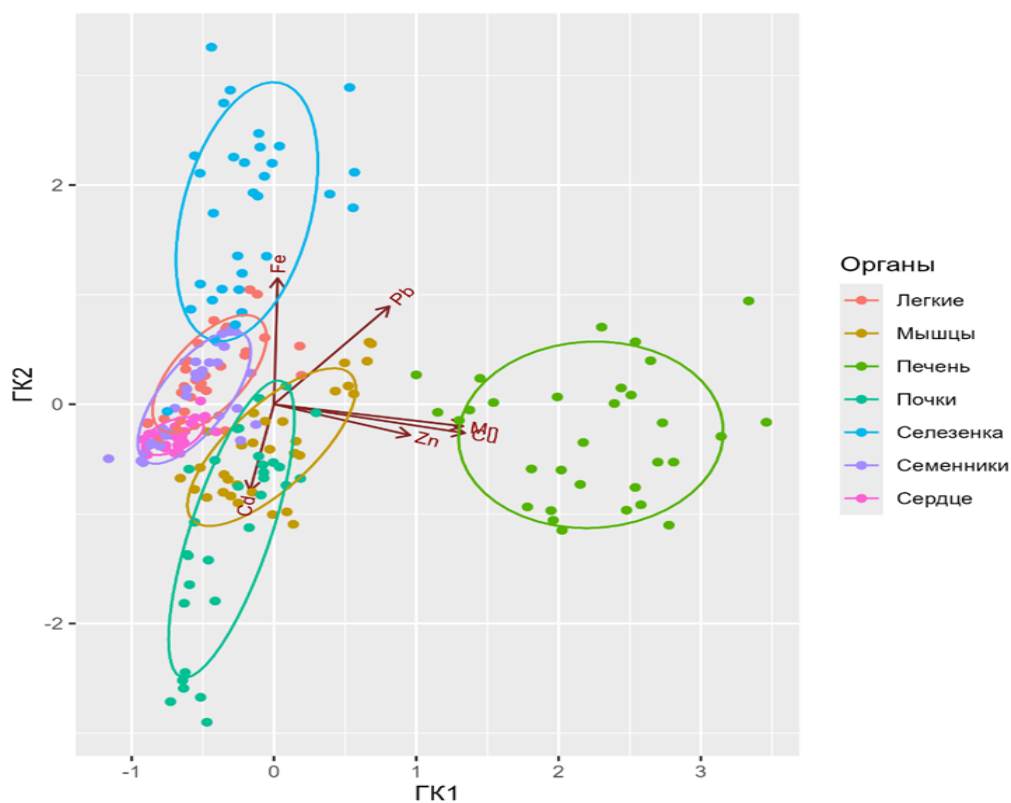


Рисунок 2 – Распределение органов и тканей герефордского скота в пространстве главных компонент

Выявленные закономерности подчеркивают важность учета органо- и тканеспецифичности при оценке элементного статуса и рисков контаминации продукции животноводства.

3.4 Влияние эколого-географических условий на концентрацию тяжелых металлов в органах герефордского скота

С целью оценки влияния региональных факторов на минеральный обмен у герефордского скота было проведено исследование содержания эссенциальных (Zn, Mn, Fe, Cu) и токсичных (Cd, Pb) элементов в селезенке, легких, сердце и семенниках бычков герефордской породы, выращенных в различных эколого-географических условиях юга Западной Сибири (Краснозерский, Маслянинский, Новосибирский районы Новосибирской области и Целинный район Алтайского края).

Анализ содержания железа, марганца и цинка в селезенке выявил относительно низкую межгрупповую изменчивость для цинка, в то время как для железа и марганца вариабельность была выше. Наибольший размах значений по содержанию марганца наблюдался у животных из Маслянинского района, по железу – в Краснозерском и Новосибирском районах. Несмотря на некоторые визуальные различия в медианных значениях и вариабельности между районами, статистический анализ с использованием непараметрического критерия Краскела-Уоллиса не выявил существенного влияния эколого-географического фактора на содержание Zn, Mn и Fe в селезенке ($p > 0,05$). Это свидетельствует об эффективности механизмов гомеостаза данных эссенциальных микроэлементов и указывает на схожие условия кормления в исследованных хозяйствах.

Исследование легких показало, что содержание железа, марганца, меди, свинца и кадмия в целом было невысоким. Наибольшая фенотипическая изменчивость концентрации железа, марганца и меди наблюдалась в Маслянинском районе. Уровень кадмия также был минимальным у животных из этого района. Уровни критерия Краскела-Уоллиса свидетельствовали о статистически значимом влиянии эколого-географического фактора только на уровень цинка ($H=12,2$, $p=0,007$) и кадмия ($H=21,5$, $p<0,001$) в легких бычков. Апостериорный анализ показал, что уровень кадмия в легких у животных из Маслянинского района был достоверно ниже ($p<0,05$), а уровень цинка – статистически значимо выше ($p<0,05$), чем у скота из других районов. Для железа, марганца, меди и свинца значимого влияния районирования не обнаружено ($p>0,05$). В связи с этим были рассчитаны региональные

референтные интервалы содержания данных металлов в легких герефордского скота (таблица 2).

Таблица 2 – Референтные интервалы концентрации тяжелых металлов в органах герефордского скота (мг/кг)

Орган	Показатель	Референтный интервал	Нижний предел 90% ДИ	Верхний предел 90% ДИ
Легкие	Mn	<0,01 – 1,12	<0,01	0,879 – 1,421
	Fe	<0,01 – 148,1	<0,01 – 18,59	124,0 – 190,8
	Pb	<0,001 – 0,170	<0,001 – 0,009	0,145 – 0,204
	Cu	0,62 – 2,54	0,31 – 0,85	2,28 – 2,94
Семенники	Mn	<0,01 – 0,96	<0,01 – 0,11	0,78 – 1,17
	Fe	8,72 – 37,19	4,31 – 12,47	34,31 – 41,27
Сердце	Mn	0,106 – 0,545	0,051 – 0,153	0,488 – 0,609

Примечание. Здесь и далее: ДИ – доверительный интервал.

Анализ содержания марганца в сердце показал низкую фенотипическую изменчивость во всех районах, за исключением Маслянинского. Критерий Краскела-Уоллиса не выявил статистически значимого влияния эколого-географического фактора на содержание марганца в миокарде ($H=0,66$, $p>0,05$), что подтверждает стабильность уровня данного элемента в сердечной ткани. Были рассчитаны референтные интервалы концентрации марганца в сердце для герефордского скота, разводимого в условиях южной части Западной Сибири.

Исследование семенников на содержание железа, марганца и цинка выявило значимое влияние эколого-географического фактора на уровень цинка ($H=16,35$, $p<0,001$) и маргинальное влияние на уровень железа ($H=7,86$, $p=0,05$). Для марганца значимого влияния районирования не обнаружено. Апостериорный анализ показал, что уровень цинка в семенниках бычков из Маслянинского района был статистически значимо выше ($p<0,05$) по сравнению со всеми остальными районами. Медианные значения железа и марганца, напротив, были ниже в Маслянинском районе, где также наблюдалась наибольшая фенотипическая изменчивость этих элементов. Рассчитаны региональные референтные интервалы для содержания железа и марганца в семенниках герефордского скота.

Таким образом, комплексное исследование показало ограниченное влияние эколого-географических условий юга Западной Сибири на валовое содержание большинства изученных эссенциальных микроэлементов в органах герефордского скота, что подтверждает их адаптивный потенциал и эффективность механизмов гомеостаза. Однако выявлена выраженная

региональная специфика Маслянинского района, характеризующаяся повышенной концентрацией цинка в легких и семенниках и пониженной концентрацией кадмия в легких, что указывает на необходимость учета локальных факторов среды при оценке минерального статуса животных. Разработанные региональные референтные интервалы содержания железа и марганца в органах могут служить практическими ориентирами для зоотехнической и ветеринарной практики.

3.5 Закономерности кластеризации распределения марганца в органах и тканях герефордского скота

Марганец является эссенциальным микроэлементом, неравномерно распределенным в организме животных. Для углубленного изучения паттернов его аккумуляции у герефордского скота был проведен детальный анализ концентрации Mn в семи различных органах и тканях (мышцы, сердце, печень, почки, легкие, семенники, селезенка) с использованием многомерных статистических методов.

Анализ описательных статистик (таблица 3) подтвердил выраженную органоспецифичность накопления Mn. Наиболее высокая средняя концентрация зафиксирована в печени (2,83 мг/кг), значительно превышая уровни в других тканях. Почки заняли второе место по концентрации Mn (1,05 мг/кг). В остальных органах (сердце, семенники, легкие, селезенка) и мышечной ткани средние уровни Mn были значительно ниже (0,24–0,43 мг/кг). Коэффициент вариации (Cv) был наименьшим в селезенке (15,6%) и наибольшим в легких (29,1%), указывая на разную степень однородности накопления Mn. Распределение концентраций Mn в большинстве тканей, за исключением сердца, значимо отличалось от нормального ($p < 0,01$).

Таблица 3 – Концентрация марганца в органах и мышечной ткани герефордского скота, мг/кг

Орган/ткань	\bar{x}	S_x	σ	Cv	Me	Min	Max	Q ₁	Q ₃	IQR	SW.p
Мышцы	0,24	0,01	0,058	24,2	0,2	0,1	0,8	0,2	0,32	0,12	<0,01
Сердце	0,348	0,01	0,076	22,0	0,37	0,13	0,66	0,28	0,42	0,14	0,34
Печень	2,83	0,14	0,773	27,3	2,6	2,0	5,34	2,36	3,39	1,03	<0,01
Почки	1,05	0,04	0,21	20,0	1,0	0,9	2,45	0,92	1,2	0,30	<0,01
Легкие	0,379	0,02	0,11	29,1	0,4	0,133	1,56	0,3	0,48	0,18	<0,01
Семенники	0,431	0,02	0,094	21,9	0,5	0,2	1,73	0,32	0,5	0,18	<0,01
Селезенка	0,419	0,01	0,065	15,6	0,4	0,327	2,12	0,4	0,48	0,08	<0,01

Примечание. Здесь и далее: \bar{x} – среднее арифметическое значение; S_x – стандартная ошибка; σ – стандартное отклонение; Cv – коэффициент вариации; Me – медиана; Min – минимальное значение; Max – максимальное значение; Q_1 – первый квартиль; Q_3 – третий квартиль; IQR – межквартильный размах; $SW.p$ – уровень значимости критерия Шапиро-Уилка.

Корреляционный анализ выявил преимущественно слабые связи между концентрациями Mn в разных органах, что свидетельствует об относительно независимых механизмах регуляции его содержания. Наиболее сильной оказалась отрицательная корреляция между печенью и семенниками ($r=-0,53$, $p<0,01$). Умеренная положительная корреляция наблюдалась между семенниками и селезенкой ($r=0,39$, $p<0,05$).

Применение метода главных компонент позволило выделить две основные оси изменчивости, объясняющие 46,5% общей дисперсии. Первая главная компонента (ГК1, 27,6% дисперсии) в наибольшей степени определялась вариациями Mn в семенниках (вклад 35,4%) и селезенке (вклад 26,2%), формируя условную «иммунно-репродуктивную ось». Вторая главная компонента (ГК2, 18,9% дисперсии) преимущественно отражала изменчивость в печени (вклад 49,2%) и легких (вклад 27,5%), представляя собой «метаболическую ось» (таблица 4).

Таблица 4 – Корреляция и коэффициент детерминации между признаками и главными компонентами

Признак	Корреляция Пирсона		Коэффициенты детерминации	
	ГК1	ГК2	ГК1	ГК2
Мышцы	0,46	0,29	0,21	0,09
Сердце	0,37	-0,13	0,14	0,02
Печень	-0,29	0,81	0,08	0,65
Почки	0,43	0,39	0,19	0,15
Легкие	0,35	0,6	0,12	0,36
Семенники	0,83	-0,23	0,68	0,05
Селезенка	0,71	-0,06	0,51	0,01

Визуализация данных в пространстве первых двух ГК (рисунок 3) показала четкое разделение органов по этим осям и выявила ядро выборки (большинство животных) со схожим профилем накопления Mn , а также отдельные наблюдения с отклонениями вдоль выделенных осей.

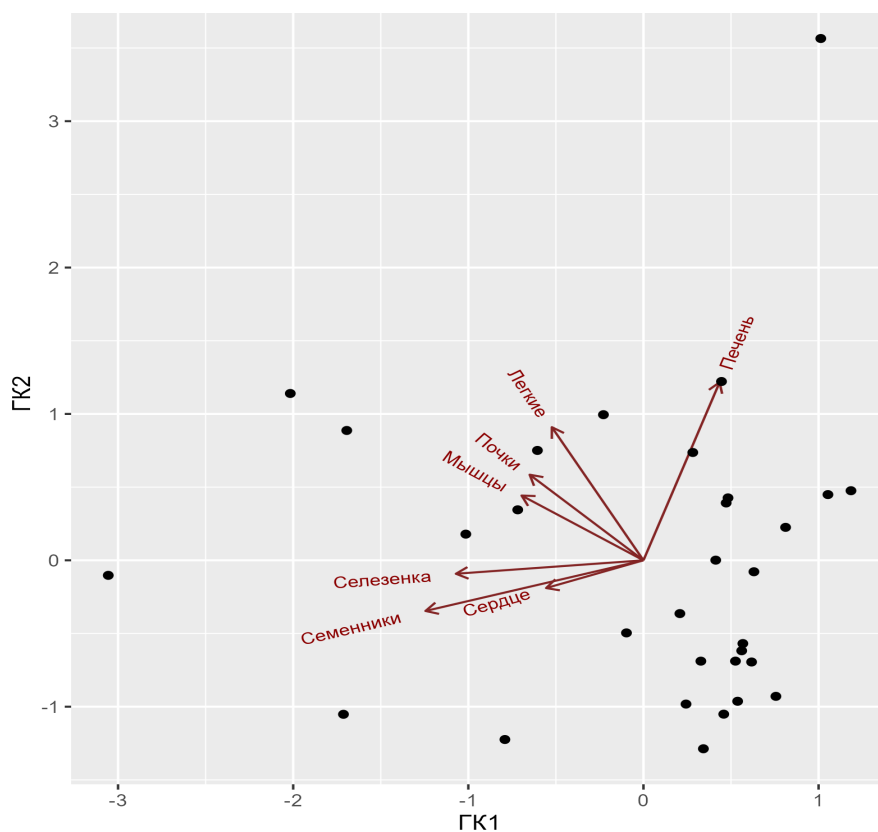


Рисунок 3 – Распределение органов и тканей герефордского скота в пространстве главных компонент

Для формальной группировки органов по сходству накопления Мп был проведен иерархический кластерный анализ. На основе анализа кофенетических корреляций для различных комбинаций методов и метрик, оптимальными были признаны метод средней связи и евклидово расстояние (кофенетическая корреляция 0,98). Рассчитанная матрица дистанций подтвердила наибольшие различия между печенью и другими органами. Методы оценки оптимального числа кластеров (локтя, силуэта, статистики разрыва) указывали на целесообразность выделения трех кластеров.

Построенная дендрограмма (рисунок 4) наглядно продемонстрировала разделение органов на три четких кластера: кластер 1 – печень (наибольшее расстояние от других); кластер 2 – почки; кластер 3 – семенники, селезенка, легкие, мышцы, сердце. Внутри третьего кластера наблюдалась иерархия: наиболее тесная связь выявлена между семенниками и селезенкой, к которым затем присоединялись легкие; отдельно группировались мышцы и сердце.

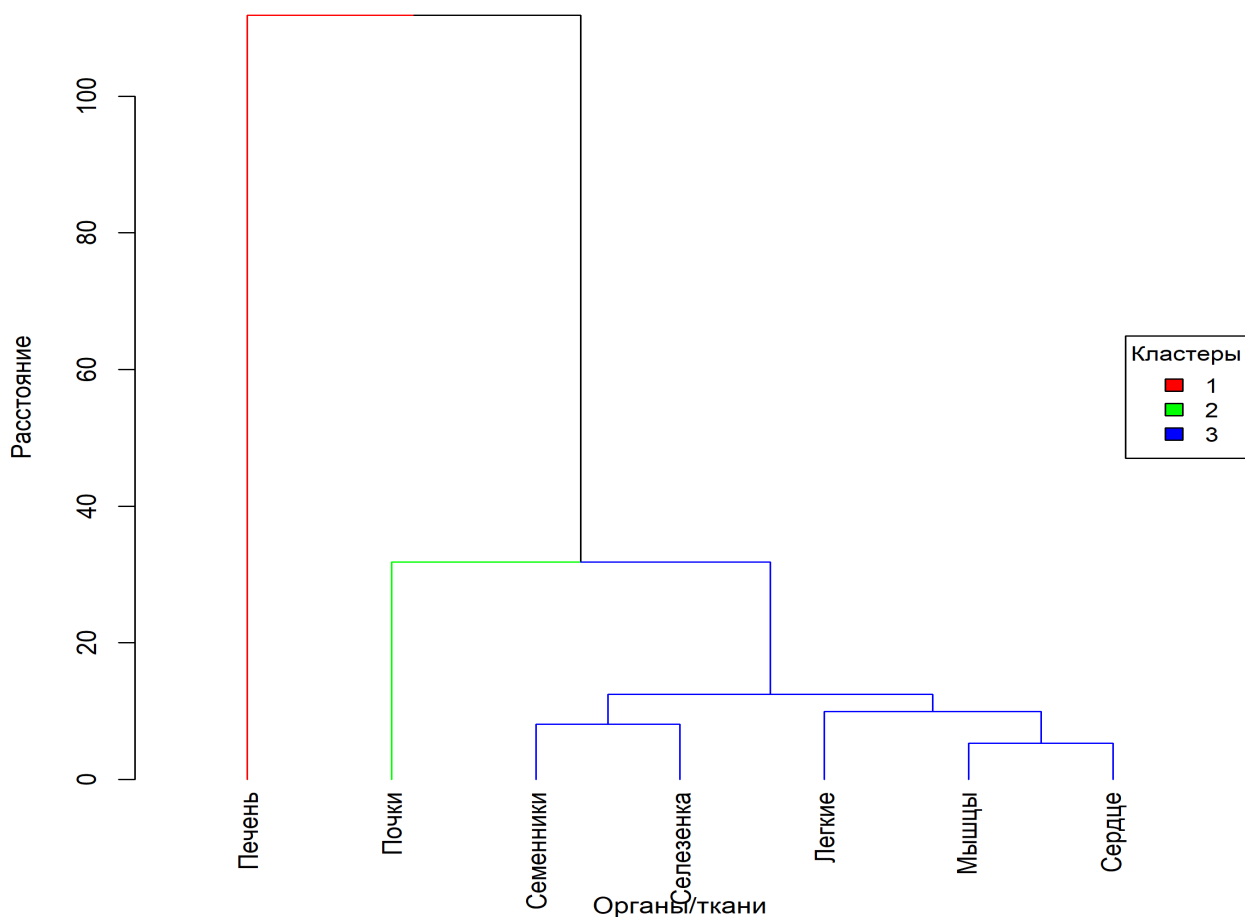


Рисунок 4 – Дендрограмма сходства органов и мышечной ткани герефордского скота (метод средней связи, евклидово расстояние)

Результаты кластерного анализа полностью согласуются с данными PCA и корреляционного анализа, подтверждая особую роль печени и почек в метаболизме Mn и выделяя группу органов с более низким и сходным уровнем накопления данного микроэлемента.

3.6 Межпородные особенности накопления цинка в органах крупного рогатого скота

Цинк является эссенциальным микроэлементом с фундаментальной ролью в метаболизме, иммунитете и репродукции крупного рогатого скота. Исследование межпородных различий в его аккумуляции важно для понимания физиологии минерального обмена и оптимизации минерального питания животных разных пород. В данном разделе представлены результаты сравнительного анализа содержания цинка в органах скота мясного (геррефордская порода) и молочного (черно-пестрая порода) направлений продуктивности.

Анализ описательных статистик (таблица 5) показал существенные вариации концентрации цинка в зависимости от органа и породы. Наиболее высокое содержание Zn обнаружено в печени, что отражает ее роль как основного депо. У герефордской породы установлено статистически значимое более высокое среднее содержание цинка в печени (41,5 мг/кг против 34,0 мг/кг у черно-пестрой), почках (23,4 мг/кг против 19,6 мг/кг) и селезенке (21,7 мг/кг против 16,0 мг/кг). В легких, напротив, наблюдалась тенденция к более высокому содержанию Zn у черно-пестрой породы (20,2 мг/кг против 18,8 мг/кг). Распределение содержания цинка в почках обеих пород отклонялось от нормального ($p < 0,001$).

Таблица 5 – Описательные статистики содержания цинка (мг/кг) в органах крупного рогатого скота

Орган	Порода	\bar{x}	$S_{\bar{x}}$	σ	Me	Min	Max	Cv	SW.p
Печень	Черно-пестрая	34,0	0,91	4,64	32,8	27,1	45,0	13,7	0,156
	Герефордская	41,5	1,19	6,16	42,7	31,1	51,9	14,8	0,064
Почки	Черно-пестрая	19,3	1,39	7,11	17,2	12,8	35,7	36,7	<0,001
	Герефордская	24,7	2,07	10,8	20,6	16,1	35,4	43,6	<0,001
Легкие	Черно-пестрая	20,2	0,62	3,16	20,6	13,7	25,2	15,7	0,437
	Герефордская	18,8	0,533	2,77	18,4	15,2	26,6	14,7	0,126
Селезенка	Черно-пестрая	16,0	0,265	1,35	15,8	13,6	19,3	8,5	0,315
	Герефордская	21,7	0,416	2,16	21,6	16,3	27,1	10,0	0,429

Статистическое сравнение средних значений подтвердило наличие достоверных межпородных различий. С использованием t-критерия Стьюдента (для печени) и t-критерия Уэлча (для селезенки, ввиду гетерогенности дисперсий) установлены значимые различия ($p < 0,0001$) в этих органах. U-критерий Манна-Уитни показал значимые различия и для почек ($p = 0,002$). В легких статистически значимых различий между породами не выявлено ($p = 0,109$). Таким образом, герефордская порода характеризуется достоверно более высоким накоплением цинка в печени, почках и селезенке.

Для комплексной оценки и визуализации межпородных различий был применен метод главных компонент. Первые две главные компоненты (ГК1 и ГК2) объясняли 70,5% общей дисперсии содержания цинка в органах. Анализ факторных нагрузок (таблица 6) показал, что ГК1 в наибольшей степени положительно коррелирует с содержанием Zn в печени (0,446) и селезенке (0,419), отражая общую тенденцию к аккумуляции Zn в органах метаболизма и

иммунитета. ГК2 имела сильную отрицательную нагрузку для почек (-0,444), вероятно, отражая вариабельность процессов экскреции цинка.

Таблица 6 – Вклад переменных (органов) в главные компоненты

Орган	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4
Печень	0,4458	0,0891	0,1386	0,2269
Почки	0,0817	-0,4439	-0,2507	0,1037
Легкие	-0,2644	-0,2969	0,3401	0,0602
Селезенка	0,4192	-0,1954	0,1160	-0,2236

Диаграмма рассеяния животных в пространстве первых двух ГК (рисунок 5) наглядно демонстрирует четкое разделение породных групп.

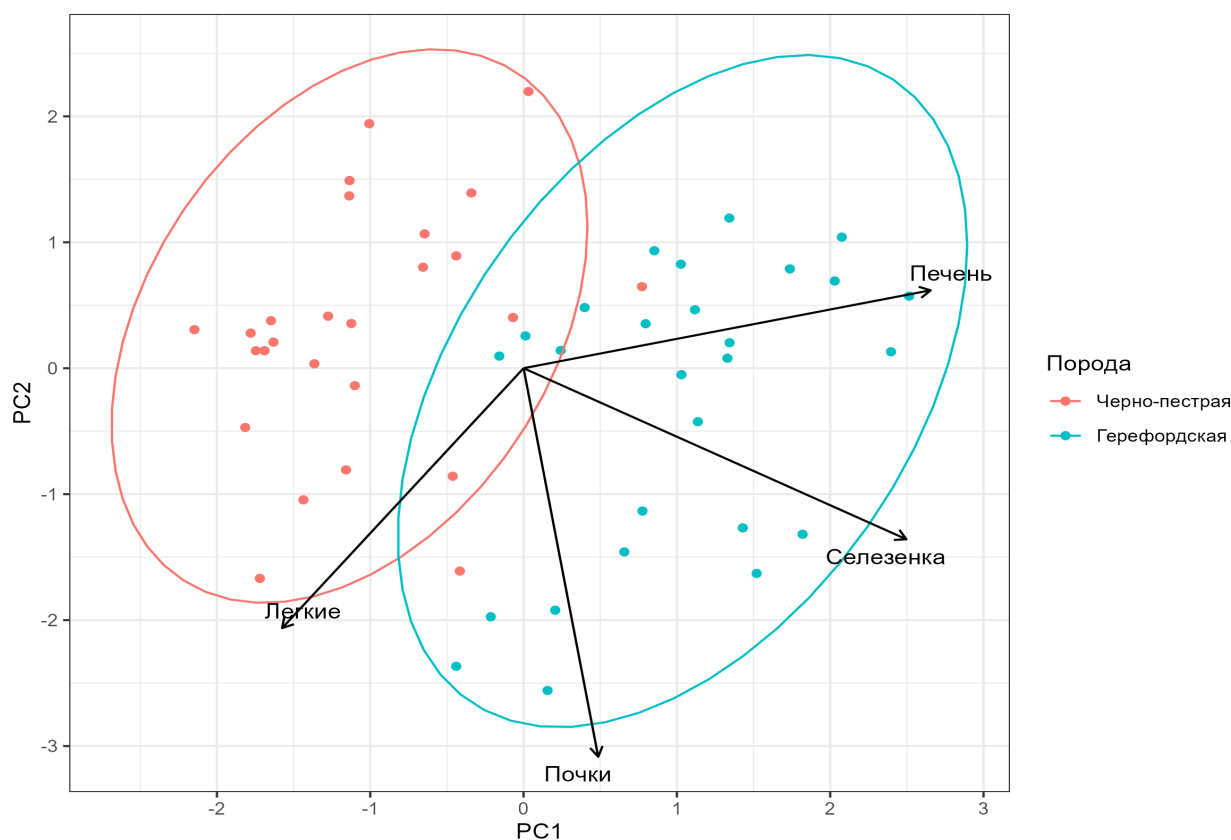


Рисунок 5 – Диаграмма рассеяния содержания цинка в органах крупного рогатого скота в пространстве первых двух главных компонент

Эллипс рассеяния для геррефордской породы смещен вправо вдоль оси ГК1 (указывая на более высокое содержание Zn в печени и селезенке) и вниз вдоль оси ГК2 (указывая на более высокое содержание Zn в почках) относительно черно-пестрой породы. Направления векторов органов на диаграмме согласуются с факторными нагрузками.

Выявленные межпородные различия могут быть обусловлены генетически детерминированными особенностями абсорбции, транспорта (активность белков ZIP, ZnT), депонирования (активность металлотионеинов) и метаболизма

цинка, а также различиями в физиологических потребностях, связанных с направлением продуктивности.

Для установления физиологических границ нормы были рассчитаны породно-специфичные 95% референтные интервалы содержания цинка. Для герефордской породы интервалы были сдвинуты в сторону более высоких значений по сравнению с черно-пестрой породой для всех трех органов: печень (29,4–53,6 и 24,0–43,5 мг/кг), почки (10,5–37,3 и 6,4–32,8 мг/кг) и селезенка (17,4–25,8 и 13,2–19,0 мг/кг). Эти породно-специфичные интервалы имеют важное практическое значение для диагностики элементного статуса и разработки дифференцированных норм минерального питания.

Таким образом, установлено существенное влияние породной принадлежности на метаболизм и аккумуляцию цинка в органах крупного рогатого скота, что необходимо учитывать при оценке минерального статуса и разработке стратегий кормления.

3.7 Межпородные особенности соотношений тяжелых металлов в органах и тканях герефордского и черно-пестрого скота

Изучение элементного состава органов и тканей крупного рогатого скота имеет фундаментальное и прикладное значение для понимания механизмов элементного гомеостаза и разработки методов контроля качества продукции и коррекции элементного статуса животных. Тяжелые металлы (ТМ), включая эссенциальные (Mn, Zn, Cu, Fe) и токсичные (Cd, Pb) элементы, играют сложную роль в организме. Анализ соотношений ТМ, таких как Cu/Zn и Fe/Mn, является важным показателем баланса микроэлементов и может отражать адаптивные механизмы организма (Williams, 1983). Нарушение баланса, особенно между эссенциальными и токсичными металлами, может служить ранним индикатором неблагоприятных воздействий ((Sun et al., 2022). Породные различия в метаболизме ТМ обусловлены генетическими особенностями, физиологией и условиями содержания (Khan et al. 2010).

У герефордов соотношение Cd/Zn максимально в почках (0,0187), что отражает роль почек в кумуляции кадмия. Cu/Zn максимально в печени (0,705), что подчеркивает ее роль в гомеостазе меди. Fe/Mn наиболее высоко в селезенке (545,2) и легких (198,4). Pb/Cd максимально в селезенке (11,9) и сердце (8,76). Распределение большинства соотношений у герефордов отличалось от нормального ($p < 0,05$), что указывает на необходимость использования непараметрических методов при сравнении.

У черно-пестрого скота Cd/Zn также максимально в почках (0,0079). Cu/Zn максимально в печени (0,343), но ниже, чем у герефордов. Наиболее

разительные отличия: Fe/Mn в селезенке (2350,2) многократно выше, чем у геррефордов; Pb/Cd в сердце (446,5), легких (49,0) и печени (22,9) на порядки выше. Распределение большинства соотношений у черно-пестрых также отличалось от нормального ($p < 0,05$).

Анализ гомогенности дисперсий выявил статистически значимую гетерогенность ($p < 0,05$) для Cu/Zn в волосе и легких; Pb/Cd в сердце, почках, печени и легких; Fe/Mn в почках и легких; Cd/Zn в легких и мышцах; Cd/Zn, Cu/Zn и Fe/Mn в селезенке, что подтверждает разную степень индивидуальной изменчивости у пород.

Сравнение средних значений показало, что соотношение Cd/Zn значимо выше у геррефордов в печени ($p=0,0004$) и легких ($p<0,0001$), но значительно ниже в селезенке ($p<0,0001$). В почках различий нет ($p=0,54$). Соотношение Cu/Zn выше у черно-пестрых в сердце, почках и мышцах ($p<0,0001$), но выше у геррефордов в печени и легких ($p<0,0001$). Соотношение Fe/Mn выше у черно-пестрых в волосе ($p<0,001$), сердце ($p=0,025$), легких ($p<0,0001$), мышцах ($p=0,008$) и особенно в селезенке ($p<0,0001$). Соотношение Pb/Cd кардинально выше у черно-пестрых в сердце ($p<0,0001$), печени ($p=0,0002$) и легких ($p<0,0001$).

Выявленные межпородные различия в соотношениях ТМ указывают на сложную, органоспецифическую и породно-зависимую регуляцию минерального обмена. Высокие значения Fe/Mn в селезенке и Pb/Cd в сердце, печени и легких у черно-пестрой породы требуют особого внимания. Эти различия, вероятно, обусловлены комплексом генетических, диетических и физиологических факторов, и могут иметь значительные последствия для здоровья животных и безопасности продукции. Необходимо дальнейшее изучение механизмов этих различий и разработка дифференцированных подходов к минеральному питанию.

3.8 Межпородные особенности корреляций между уровнем марганца в органах и тканях бычков молочного и мясного направления продуктивности

В рамках исследования межпородных особенностей минерального обмена изучены корреляционные связи марганца (Mn) в органах и тканях бычков геррефордской (мясной) и голштинской (молочной) пород с использованием коэффициента корреляции Спирмена.

Установлены существенные породные различия в характере и количестве значимых корреляций. Для геррефордской породы характерно большее число (9) как положительных (например, между легкими и семенниками: $r=0,789$,

$p < 0,001$; почками и селезенкой: $r = 0,515$, $p < 0,01$), так и отрицательных (например, между почками и волосом: $r = -0,457$, $p < 0,05$; печенью и семенниками: $r = -0,559$, $p < 0,01$) значимых корреляций концентраций Mn. Это указывает на сложные взаимосвязи в метаболизме марганца, затрагивающие пути его элиминации и распределения между органами.

У голштинской породы выявлено меньшее количество (2) значимых корреляций, которые носили исключительно положительный характер (печень-сердце: $r = 0,508$, $p < 0,01$; сердце-волос: $r = 0,400$, $p < 0,05$), что свидетельствует об иных приоритетах в распределении и метаболизме марганца у данной породы.

Выявленные различия указывают на породную специфику метаболизма марганца, включая пути его элиминации и депонирования. Большое число и разнонаправленность корреляций у герефордов может свидетельствовать о наличии более интегрированной и, возможно, многоуровневой системы регуляции обмена данного микроэлемента, что может быть фактором их адаптации. Полученные результаты важны для понимания физиологических особенностей минерального обмена у бычков разных пород и могут быть использованы при оптимизации рационов по марганцу.

3.9 Межвидовые различия по содержанию цинка в мышечной ткани сельскохозяйственных животных

Цинк является незаменимым микроэлементом, а продукты животного происхождения, включая мышечную ткань, служат важным его источником для человека. Учитывая зависимость потребности в цинке от вида животных, было проведено сравнительное исследование его содержания в мышечной ткани крупного рогатого скота, свиней и овец, разводимых в условиях юга Западной Сибири.

Анализ концентрации цинка выявил статистически значимые межвидовые различия ($N = 63,86$; $p < 0,001$ по критерию Краскела-Уоллиса). Средняя концентрация цинка в мышечной ткани была наиболее низкой у овец (21,2 мг/кг) и сопоставимой у крупного рогатого скота (50,1 мг/кг) и свиней (47,4 мг/кг). Апостериорный анализ с использованием критерия Данна подтвердил, что содержание цинка у овец достоверно ниже ($p < 0,001$), чем у крупного рогатого скота и свиней, в то время как различия между крупным рогатым скотом и свиньями не достигли строгой статистической значимости ($p = 0,096$).

В связи с выявленными межвидовыми различиями были рассчитаны видоспецифичные референтные интервалы содержания цинка в мышечной ткани. Референтный интервал для овец (7,12–34,81 мг/кг) оказался значительно уже и сдвинут в сторону низких значений по сравнению с крупным рогатым

скотом (27,28–73,39 мг/кг) и свиньями (<0,01–91,2 мг/кг). Широкий референтный интервал у свиней отражает высокую вариабельность концентрации цинка в их мышечной ткани.

Выявленные межвидовые различия могут быть обусловлены особенностями пищеварения (рубцовая ферментация у жвачных vs моногастричное пищеварение у свиней), разной биодоступностью цинка из кормов, различиями в активности белков-транспортеров (ZIP, ZnT) и металлотионеинов в кишечнике и мышечной ткани, а также возможными различиями в структуре мышечных волокон и активности цинк-зависимых ферментов у разных видов. Полученные результаты и видоспецифичные референтные интервалы важны для корректной оценки цинкового статуса разных видов сельскохозяйственных животных и разработки адекватных стратегий их минерального питания с целью повышения качества и пищевой ценности мясной продукции.

3.10 Влияние генотипа отцов голштинской породы на концентрацию цинка в мышечной ткани потомков

Накопление микроэлементов, включая цинк, в мышечной ткани крупного рогатого скота определяется не только средовыми, но и генетическими факторами, в том числе генотипом отцов. Изучение этого влияния важно для селекции на повышение пищевой ценности говядины. В данном разделе исследовалось влияние генотипа четырех быков-производителей голштинской породы (Karona Bonair, R-E-W-I Brio, Strout Baxter Fabio-ET, Deslacs Malstrom) на концентрацию цинка в мышечной ткани их потомков.

Распределение концентрации цинка в мышечной ткани потомков всех быков соответствовало нормальному ($p > 0,05$ по тесту Шапиро-Уилка) (таблица 9). Средние значения Zn у потомков разных быков существенно варьировали: от 40,3 мг/кг (Karona Bonair) до 64,9 мг/кг (Strout Baxter Fabio-ET), представляя ранжированный ряд: Karona Bonair < R-E-W-I Brio < Deslacs Malstrom < Strout Baxter Fabio-ET (соотношение 1 : 1,1 : 1,2 : 1,6). Фенотипическая изменчивость была умеренной, при этом наименьшая вариабельность наблюдалась у потомков Strout Baxter Fabio-ET.

Дисперсии в группах были признаны однородными ($p = 0,9$ по тесту Бартлетта). Однофакторный дисперсионный анализ выявил статистически значимое влияние генотипа отцов на концентрацию Zn в мышечной ткани потомков ($F = 7,38$, $P = 0,00076$). Доля влияния генотипа отцов на общую изменчивость признака составила 43%.

Таблица 9 – Оценка средней тенденции и характера распределения содержания цинка в мышечной ткани голштинского скота, мг/кг

Быки-производители	\bar{x}	Me	$S_{\bar{x}}$	σ	Cv	Min	Max	SW.p
Karona Bonair	40,3	37	5,0	12,3	30,6	29	61	0,4
R-E-W-I Brio	44,9	46	3,7	11	24,6	26	59	0,7
Strout Baxter Fabio-ET	64,9	64	3,4	11,3	17,5	44	84	0,94
Deslacs Malstrom	46,6	45	5,1	14,4	30,9	23	70	0,91
Общее	51	49	2,6	15,3	30,1	23	84	0,9

Апостериорный анализ (HSD-тест Тьюки) показал, что потомки быка Strout Baxter Fabio-ET достоверно отличались по уровню Zn от потомков всех других быков ($p < 0,02$), имея значимо более высокую концентрацию (рисунок 6). Статистически значимых различий между потомками Karona Bonair, R-E-W-I Brio и Deslacs Malstrom не выявлено.

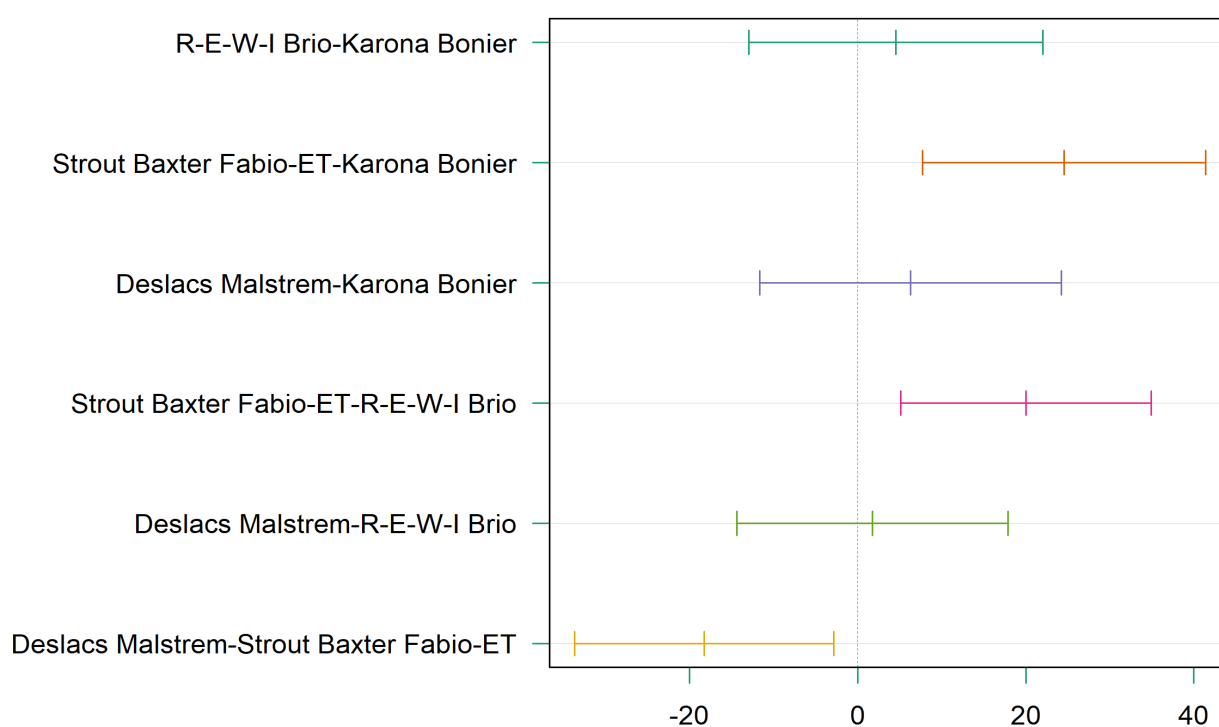


Рисунок 6 – Парные сравнения групповых средних с 95% доверительными интервалами

Дендрограмма сходства подтвердила обособленность кластера потомков Strout Baxter Fabio-ET (рисунок 7).

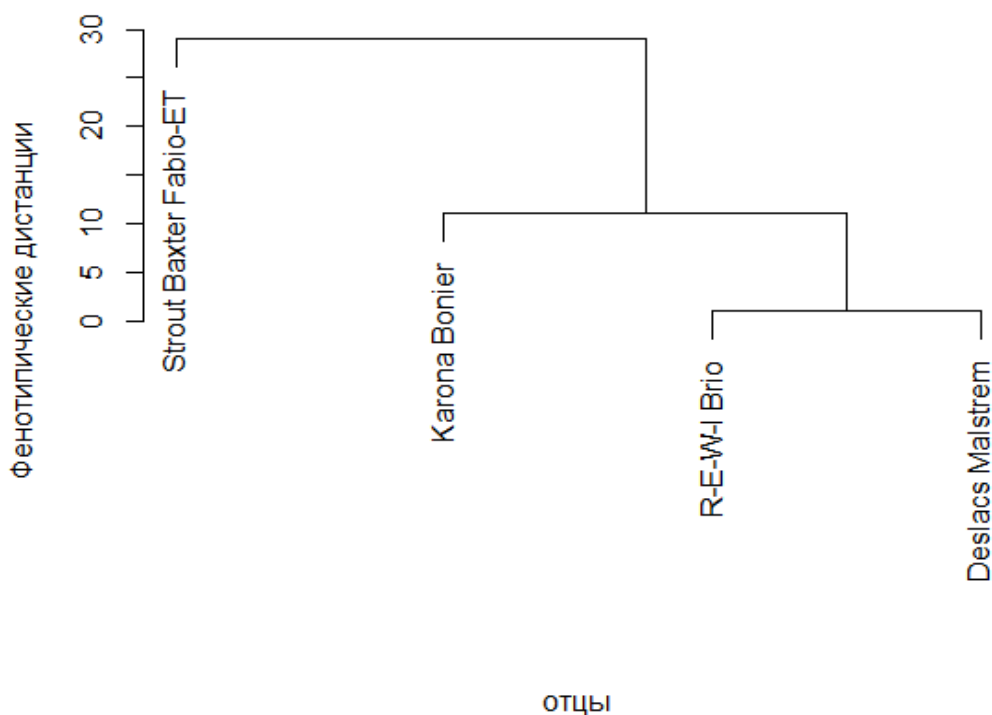


Рисунок 7 – Дендрограмма распределения уровня цинка в мышечной ткани потомков быков-производителей голштинской породы

Полученные результаты свидетельствуют о генетической детерминированности уровня цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота и открывают перспективы для селекции на оптимизацию минерального состава говядины и повышения ее пищевой ценности. Выявленные различия между генотипами отцов и оценка доли влияния генотипа отцов на концентрацию цинка в мышечной ткани могут быть использованы для разработки селекционных программ, направленных на улучшение качества мясной продукции и повышение экономической эффективности мясного скотоводства.

3.11 Модели оценки и прогнозирования аккумуляции химических элементов в органах и тканях крупного рогатого скота

Разработка методов прижизненного неинвазивного прогнозирования содержания химических элементов, особенно тяжелых металлов, в мышечной ткани крупного рогатого скота является актуальной задачей для контроля качества и безопасности продукции, а также для управления минеральным обменом животных. В данном разделе представлены результаты разработки и валидации регрессионных моделей для прогнозирования концентраций железа (Fe), марганца (Mn), цинка (Zn) и кадмия (Cd) в мышечной ткани герефордского скота на основе легкодоступных гематологических и биохимических показателей крови (таблица 10).

Таблица 10 – Обозначение и расшифровка для комплекса независимых переменных, используемых для селекции регрессионных моделей

Показатель	Единицы измерения	Переменная в модели
Уровень Fe в крови	ммоль/л	x1
Лейкоциты	$\times 10^9$ шт.	x2
Эритроциты	$\times 10^{12}$ шт.	x3
Гемоглобин	г/л	x4
СОЭ	мм/ч	x5
Цветовой показатель крови	—	x6
Протеин	г/л	x7
Альбумин	г/л	x8
Глобулин	г/л	x9
Мочевина	ммоль/л	x10
Мочевая кислота	мкмоль/л	x11
Общий холестерин	ммоль/л	x12

Построению моделей предшествовал разведочный анализ данных, включая оценку мультиколлинеарности предикторов с помощью корреляционного анализа (рисунок 8) и расчета фактора инфляции дисперсии (VIF) (таблица 11).

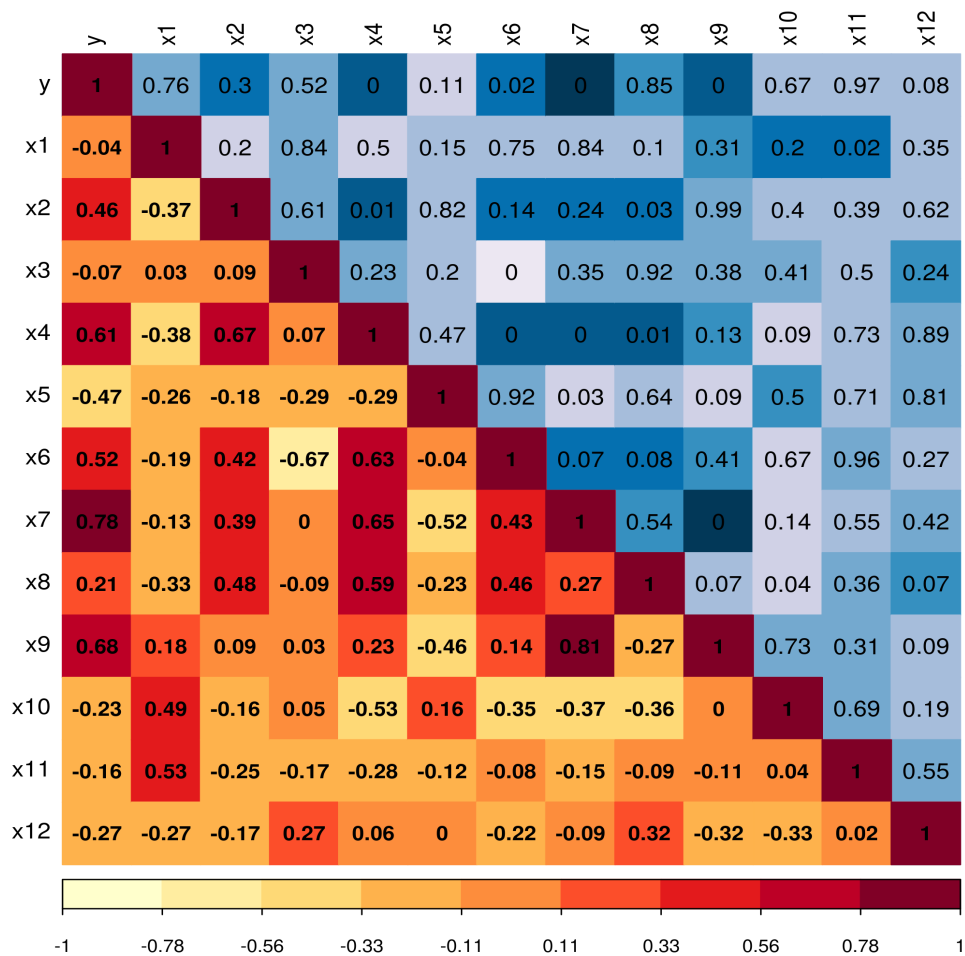


Рисунок 8 – Корреляционная матрица переменных регрессионных моделей

Таблица 11 – Значения VIF для предикторов в отобранных регрессионных моделях для Fe (модель 1), Mn (модель 2) и Zn (модель 3).

Предиктор	Модель 1	Модель 2	Модель 3
x1	–	–	–
x2	–	–	–
x3	1,7	1,2	–
x4	–	–	–
x5	–	1,2	1
x6	1,7	–	1,1
x7	–	–	–
x8	–	–	–
x9	1,2	–	–
x10	–	–	–
x11	–	–	–
x12	–	–	1,1

Селекция оптимальных моделей проводилась с использованием комбинации методов: пошагового регрессионного анализа, анализа всех подмножеств регрессий с ранжированием по внутренним критериям качества (AIC, BIC, R^2_{adj} , C_p Мэллоу), а также оценки прогностической способности с помощью внешнего критерия – кросс-валидации ($r \times k$ -fold CV). Тщательно проверялось выполнение допущений линейной регрессии для отобранных моделей (анализ остатков на нормальность, гомоскедастичность, независимость, отсутствие влиятельных выбросов).

Для железа (модель 1) была отобрана модель, включающая три предиктора: количество эритроцитов (КЭ, x3), цветовой показатель (ЦП, x6) и уровень глобулина (Г, x9). Модель показала хорошее качество как по внутренним критериям (лучшая по BIC и C_p Мэллоу), так и по результатам кросс-валидации выявлена низкая ошибка прогноза, $R^2=0,74$ (рисунок 9). Уравнение регрессии имеет вид: $y(Fe) = -9,583 + 1,551 \times \text{КЭ} + 11,503 \times \text{ЦП} + 0,212 \times \text{Г}$.

Модель имеет четкое биологическое обоснование, связывая уровень железа в мышцах с показателями эритропоэза и уровнем транспортных белков (трансферрин входит во фракцию глобулинов).

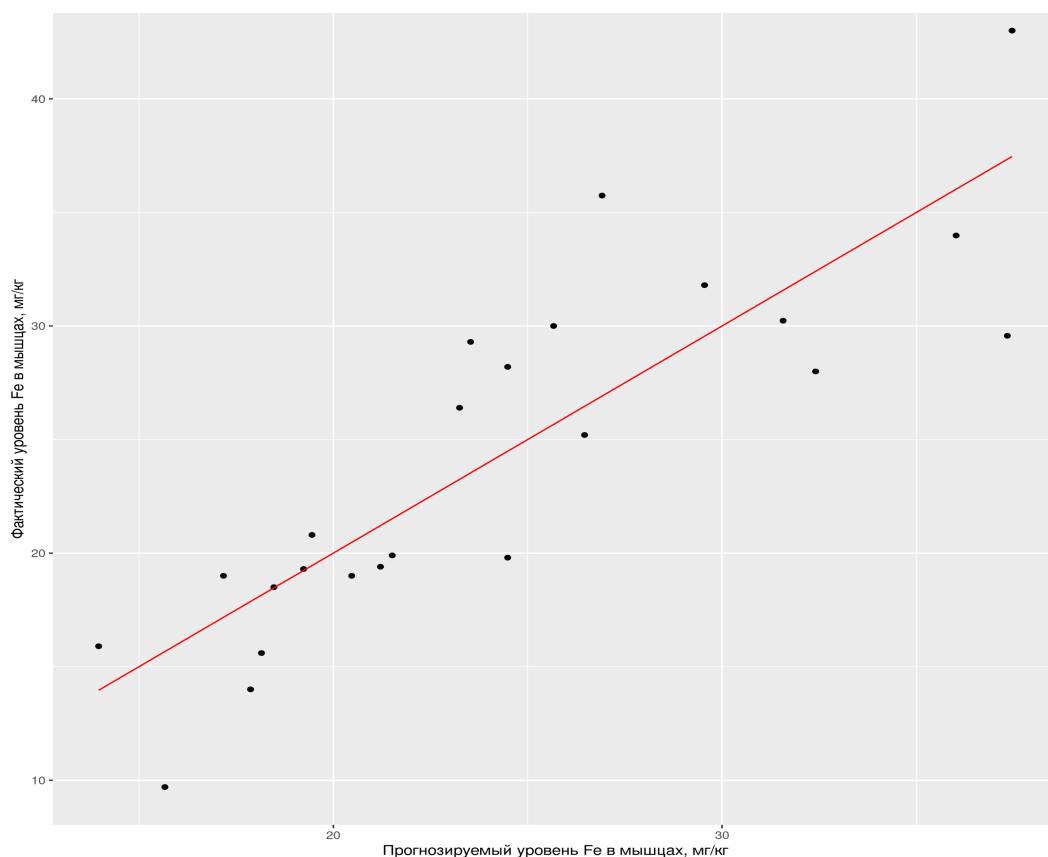


Рисунок 9 – Модель ожидаемого и фактического уровня железа в мышечной ткани крупного рогатого скота

Для марганца (модель 2) по результатам селекции и кросс-валидации оптимальной признана модель с двумя предикторами: скорость оседания эритроцитов (СОЭ, x5) и уровень глобулина (Г, x9).

Уравнение регрессии: $y(\text{Mn}) = 0,2 - 0,052 \times \text{СОЭ} + 0,002 \times \text{Г}$.

Модель объясняет около 23% вариабельности Mn в мышцах ($R^2_{cv}=0,227$), что указывает на умеренную прогностическую точность. Отрицательная связь с СОЭ может отражать перераспределение Mn при воспалении, а положительная с глобулинами – его транспорт.

Для цинка (модель 3) наиболее точной и устойчивой (по результатам кросс-валидации $R^2_{cv}=0,489$) оказалась модель с тремя предикторами: СОЭ (x5), цветовой показатель (ЦП, x6) и общий холестерин (ОХ, x12).

Уравнение регрессии: $y(\text{Zn}) = 73,576 + 9,409 \times \text{СОЭ} - 14,461 \times \text{ЦП} - 5,218 \times \text{ОХ}$. Модель отражает связь уровня цинка в мышцах с показателями неспецифических реакций (СОЭ), эритропоза (ЦП, возможно, через антагонизм Fe-Zn) и липидного обмена (ОХ). Визуализация модели (рисунок 10) показала хороший уровень аппроксимации.

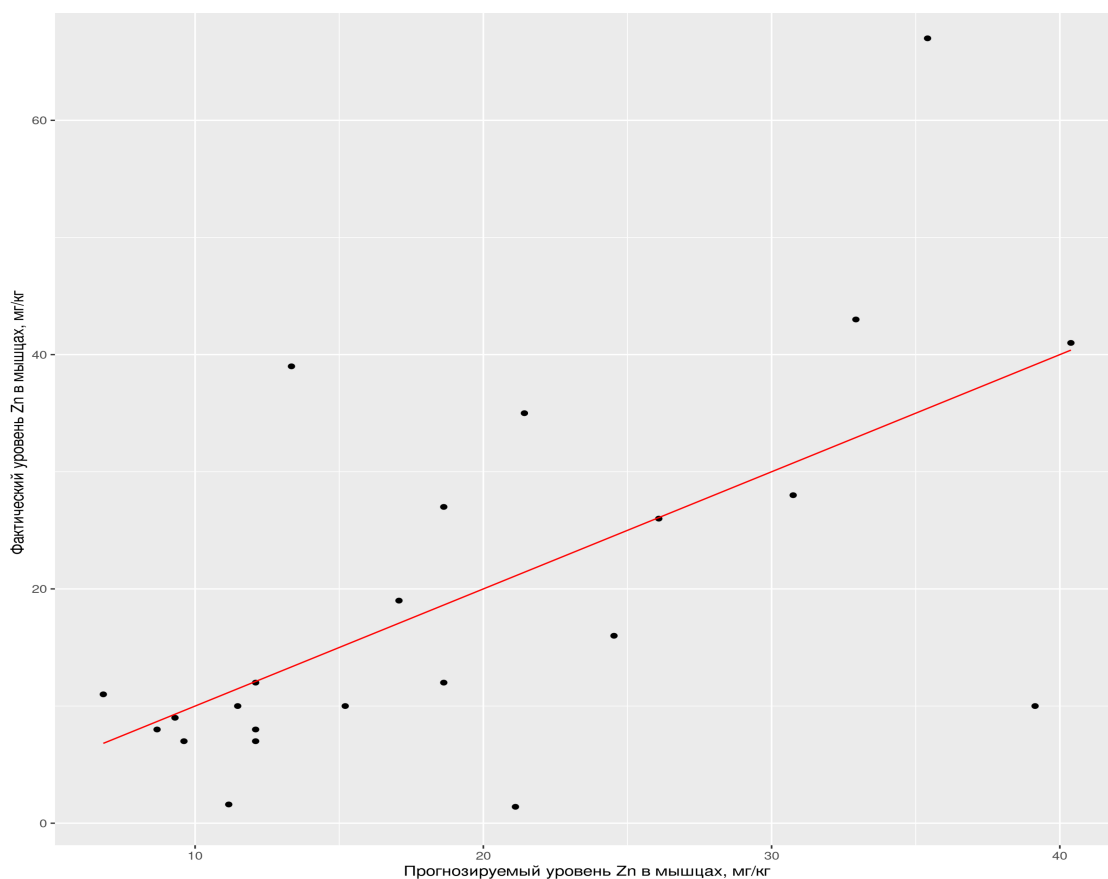


Рисунок 10 – Модель ожидаемого и фактического уровня цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота

Для кадмия была разработана и запатентована (Патент RU 2758902 C1) модель, основанная на единственном предикторе – уровне железа в сыворотке крови ($Fe_{\text{кровь}}$, x_1). Модель объясняет 38% дисперсии ($R^2=0,38$) и имеет вид (Рисунок 11): $y(Cd) = -9,71 \times 10^{-7} + 0,316 \times Fe_{\text{кровь}}$

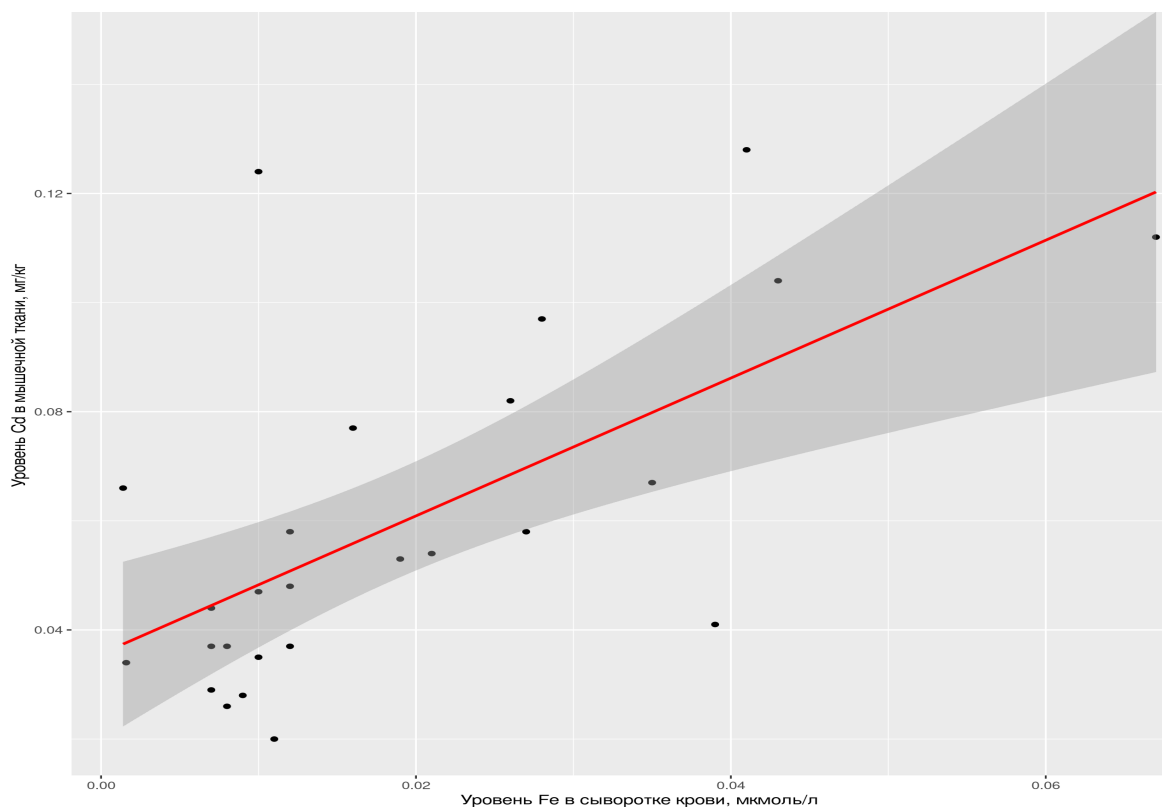


Рисунок 11 – Модель прогноза концентрации кадмия в мышечной ткани по уровню железа в сыворотки крови

Положительная связь между уровнем железа в крови и кадмием в мышцах (таблица 12), возможно, отражает общие механизмы транспорта или абсорбции, а не прямую конкуренцию в данном случае. Модель представляет собой первый шаг к прижизненной оценке накопления кадмия.

Таблица 12 – Параметры оценки коэффициентов модели прогноза уровня кадмия в мышечной ткани

Коэффициенты	Оценки коэффициентов	Стандартные ошибки коэффициентов	t-статистика	p _t
Свободный член	$-9,71 \times 10^{-7}$	0,0053	0,001	0,99
x1	0,316	0,079	4,000	<0,001
RSE – 0,0123; df = 24; F-statistic – 16,0, P < 0,001, R = 0,40; R ² = 0,38				

Разработанный комплекс регрессионных моделей демонстрирует принципиальную возможность прижизненного неинвазивного прогнозирования содержания ряда эссенциальных и токсичных элементов в мышечной ткани крупного рогатого скота на основе стандартных показателей крови. Установленные количественные взаимосвязи углубляют понимание механизмов регуляции гомеостаза микроэлементов. Представленные модели обладают удовлетворительной прогностической способностью и представляют практический интерес для мониторинга, диагностики и управления качеством продукции в животноводстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований были сформулированы следующие основные выводы:

1. Проведенная комплексная характеристика племенного стада крупного рогатого скота герефордской породы в условиях Западной Сибири, основанная на многолетнем мониторинге, показала наличие наследственной обусловленности ряда параметров, связанных с кислородтранспортной функцией крови, таких как средняя концентрация гемоглобина в эритроците ($h^2 = 0,46$), количество эритроцитов ($h^2 = 0,31$) и гемоглобин ($h^2 = 0,30$), что указывает на возможность селекции по признакам адаптивности и подтверждает их роль в приспособленности животных к экстремальным природно-климатическим условиям региона. Генетический анализ с использованием 16 микросателлитных локусов показал наличие достаточного уровня генетического разнообразия, необходимого для адаптации и селекции.

Средняя наблюдаемая гетерозиготность (H_o) составила 0,72, а среднее эффективное число аллелей (N_e) – 3,51, при отсутствии выраженного инбридинга внутри популяции (средний $F_{is} = -0,05$). Выявленные достоверные возрастные различия в гематологическом профиле подчеркивают важность учета возраста при оценке физиологического состояния животных.

2. В организме крупного рогатого скота герефордской породы выявлена выраженная органо- и тканеспецифичность в аккумуляции тяжелых металлов, что проявляется в дискретном характере их распределения. Установлено, что Cd преимущественно накапливается в почках (где его концентрация многократно выше, чем в других органах), Cu – в печени (концентрация на порядок превышает таковую в других органах), а Fe – в селезенке (концентрация многократно выше, чем в других органах/тканях). Концентрация Cu в печени в среднем в 10–20 раз (в зависимости от органа) выше, чем в других органах. Содержание Cd в почках может быть в 50–100 и более раз выше, чем, например, в мышечной ткани. Для Pb и Zn, напротив, характерно более равномерное распределение, однако и для этих металлов наблюдается значимая вариабельность: в почках и сердце изменчивость концентрации Pb в 2–6 раз ниже по сравнению с другими органами; для Zn аналогичная тенденция (снижение вариабельности в 2 и более раз) характерна для селезенки и сердца.

3. Многомерный анализ позволил установить, что большая часть изменчивости (57,9%) в распределении исследованных ТМ (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd) между семью органами и тканями (печень, почки, селезенка, сердце, легкие, семенники, мышцы) объясняется двумя главными компонентами. Первая главная компонента, объясняющая 36,9% дисперсии, отражает общую контаминацию организма ТМ (в нее вносят наибольший вклад Mn, Cu, Zn – на них приходится более 86% от общей нагрузки на ГК1) и интенсивность метаболических процессов, в которых задействованы эссенциальные микроэлементы. Вторая главная компонента, объясняющая 21% дисперсии, отражает специфику накопления ТМ в органах, выполняющих специализированные функции, и противопоставляет селезенку (депо Fe и Pb) и почки (орган элиминации Cd), что подтверждается отрицательной корреляцией между содержаниями Cd и Fe по ГК2 (-0,517).

4. Методом главных компонент установлено, что органы и ткани крупного рогатого скота герефордской породы формируют в пространстве первых двух главных компонент (объясняющих 57,9% общей дисперсии) несколько кластеров, отражающих сходство и различие в паттернах аккумуляции тяжелых металлов. Печень, как орган с максимальным содержанием Cu, Mn и Fe, образует отдельный кластер, удаленный от других органов. Почки, накапливающие наибольшее количество Cd, также формируют обособленный

кластер. Легкие, семенники и сердце группируются вместе, что свидетельствует о сходном характере аккумуляции ТМ в этих органах. Мышечная ткань, характеризующаяся относительно низким уровнем ТМ, располагается в центральной части диаграммы, отражая среднюю нагрузку ТМ на организм.

5. Комплексное исследование влияния эколого-географических условий юга Западной Сибири на аккумуляцию микроэлементов в органах герефордского скота выявило ограниченное воздействие фактора районирования на валовое содержание большинства изученных элементов, при этом статистически значимые различия ($p < 0,05$) установлены только для цинка. Для железа, марганца и меди, составляющих основу системы микроэлементного гомеостаза, межрайонные различия в концентрациях в селезенке, легких, сердце и семенниках оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$), что указывает на эффективность механизмов поддержания минерального баланса у крупного рогатого скота в различных эколого-географических условиях региона.

6. Установлена выраженная региональная специфика аккумуляции цинка в Маслянинском районе, где концентрация данного микроэлемента в семенниках герефордских бычков достоверно превышала показатели в Краснозерском, Новосибирском и Целинном районах на 16–23%. Аналогичная тенденция установлена для уровня цинка в легких. Данный факт указывает на необходимость учета региональных особенностей, в частности факторов среды Маслянинского района, при балансировке рационов по уровню цинка и оценки статуса крупного рогатого скота по этому эссенциальному микроэлементу.

7. Для герефордского скота, разводимого в условиях юга Западной Сибири, разработаны региональные референтные интервалы содержания железа и марганца в органах, охватывающие следующие диапазоны: селезенка Fe $< 0,01$ –535,9 мг/кг, Mn 0,40–2,12 мг/кг; легкие Fe $< 0,01$ –148,1 мг/кг, Mn $< 0,01$ –1,12 мг/кг; сердце Mn 0,106–0,545 мг/кг; семенники Fe 8,72–37,19 мг/кг, Mn $< 0,01$ –0,96 мг/кг. Представленные диапазоны, полученные с 90% доверительными интервалами, могут служить практически значимыми ориентирами для оценки популяционных уровней микроэлементов, диагностики отклонений от физиологической нормы и разработки региональных стратегий нормирования рационов крупного рогатого скота.

8. Установлен органоспецифичный характер распределения марганца в органах и тканях крупного рогатого скота герефордской породы. Наиболее высокая концентрация Mn обнаружена в печени (в среднем 2,83 мг/кг), что в 3–12 раз (в зависимости от органа) превышает его содержание в других исследованных органах и тканях (сердце, почки, легкие, семенники, селезенка и мышечной ткани), где средние концентрации варьируют в диапазоне 0,24–1,05

мг/кг. Почки занимают второе место по уровню аккумуляции Mn (1,05 мг/кг), что в 2,5–5 раз выше, чем в остальных органах, кроме печени.

9. Методом главных компонент выявлены две основные оси изменчивости распределения Mn, объясняющие в совокупности 46,5% общей дисперсии у герефордского скота. Первая главная компонента (27,5% дисперсии) отражает преимущественно аккумуляцию Mn в семенниках и селезенке (коэффициенты корреляции 0,83 и 0,71 соответственно) и имеет отрицательную корреляцию с содержанием Mn в печени (-0,29). Вторая главная компонента (18,96% дисперсии) в наибольшей степени связана с уровнем Mn в печени (коэффициент корреляции 0,81) и, в меньшей степени, в легких (0,60).

10. Иерархический кластерный анализ позволил разделить органы и ткани на три кластера, различающихся по характеру аккумуляции Mn: 1) печень; 2) почки; 3) семенники, селезенка, легкие, сердце, мышцы. Выделение печени и почек в отдельные кластеры подтверждает их особую роль в метаболизме Mn как органов депонирования, метаболизма (печень) и выведения (почки) данного микроэлемента. При этом внутри третьего кластера прослеживается иерархия, отражающая более тесное сходство по аккумуляции марганца между семенниками и селезенкой, а также между сердцем и мышцами.

11. Выявлены выраженные межпородные различия в аккумуляции цинка в органах крупного рогатого скота, подтверждающие существенное влияние породной принадлежности на метаболизм данного эссенциального микроэлемента. Установлено, что герефордская порода характеризуется статистически значимо более высоким средним содержанием цинка в ключевых органах метаболизма и иммунитета – печени (41,5 мг/кг против 34,0 мг/кг, $p < 0,0001$), почках (23,4 мг/кг против 19,6 мг/кг, $p = 0,002$) и селезенке (21,7 мг/кг против 16,0 мг/кг, $p < 0,0001$) в сравнении с черно-пестрой породой. Эти результаты указывают на необходимость учета породного фактора при изучении минерального обмена и разработке научно обоснованных подходов в кормлении крупного рогатого скота.

12. Многомерный анализ методом главных компонент, позволивший снизить размерность данных и визуализировать межпородные различия, подтвердил наличие выраженной дифференциации пород по степени аккумуляции цинка в пространстве первых двух главных компонент, объясняющих в совокупности 70,5% общей дисперсии содержания цинка в органах. ГК1 отражает межпородные различия по содержанию цинка в печени и селезенке, на что указывают высокие положительные факторные нагрузки для этих органов (0,446 и 0,419, соответственно). ГК2, в свою очередь, преимущественно обусловлена вариациями содержания цинка в почках, характеризующихся сильной отрицательной факторной нагрузкой (-0,444). Данная структура

факторных нагрузок и разделение пород в пространстве главных компонент указывает на наличие генетически детерминированных различий в характере распределения цинка между органами у герефордской и черно-пестрой пород, что вносит существенный вклад в общую картину межпородных различий в метаболизме цинка.

13. Полученные референтные интервалы содержания цинка в органах крупного рогатого скота, наряду с выявленными межпородными различиями в средних значениях и структуре многомерной вариабельности, открывают перспективы для разработки дифференцированных подходов к диагностике статуса цинка и оптимизации минерального питания животных разных пород. Установленные референтные интервалы (например, для печени: 29,4–53,6 мг/кг для герефордской породы и 24,0–43,5 мг/кг для черно-пестрой) могут служить основой для мониторинга микроэлементного статуса животных и оптимизации минерального питания с учетом породных особенностей метаболизма.

14. Установлено, что породы значимо различаются по соотношениям Cu/Zn ($p < 0,0001$ в сердце, почках, печени, легких, мышцах), Fe/Mn ($p < 0,01$ в волосе, сердце, легких, мышцах, селезенке) и, особенно, Pb/Cd ($p < 0,001$ в сердце, печени, легких), а также Cd/Zn ($p < 0,001$ в печени, легких, селезенке). Наиболее значительные отличия зафиксированы для соотношения Fe/Mn в селезенке, где у черно-пестрой породы оно в среднем составило 2350,2, что в 4,3 раза превышает показатель герефордов (545,2), и для соотношения Pb/Cd в сердце, которое у черно-пестрых (446,5) оказалось более чем в 50 раз выше, чем у герефордов (8,7). Также у черно-пестрой породы отмечено более высокое соотношение Cu/Zn в почках (0,26 против 0,15 у герефордов) и мышцах (0,03 против 0,023 у герефордов). В то же время, в печени соотношение Cd/Zn было выше у герефордов (0,0009 против 0,0006 у черно-пестрых). Эти различия обусловленные комплексным взаимодействием генетических, диетических и физиологических факторов, указывают на разные риски токсического воздействия ТМ у исследуемых пород.

15. В результате проведенного сравнительного анализа концентрации цинка в мышечной ткани основных видов сельскохозяйственных животных установлено наличие статистически значимых межвидовых различий. Концентрация цинка в мышечной ткани овец в среднем составила 21,2 мг/кг, что более чем в 2 раза ниже ($p < 0,001$), чем у крупного рогатого скота (50,1 мг/кг) и свиней (47,4 мг/кг), подчеркивая необходимость разработки видоспецифичных подходов к оптимизации рационов по уровню цинка и повышению пищевой ценности мясной продукции для различных видов сельскохозяйственных животных.

16. Определены видоспецифичные референтные интервалы концентрации цинка в мышечной ткани, которые продемонстрировали значительные

различия. Выявлена высокая вариабельность концентрации цинка в мышечной ткани свиней, что отражено в более широком референтном интервале ($<0,01 - 91,2$ мг/кг) по сравнению с крупным рогатым скотом ($27,28-73,39$ мг/кг) и овцами ($7,12-34,81$ мг/кг). Полученные данные свидетельствуют о необходимости учета видовых особенностей при разработке детализированных норм кормления сельскохозяйственных животных и оценке поступления цинка с мясной продукцией.

17. Установлено, что генотип отцов оказывает статистически значимое влияние ($F = 7,38, P = 0,0007$) на концентрацию цинка в мышечной ткани потомков голштинского скота, при этом доля влияния генотипа отцов на изменчивость данного признака составляет 43%. Потомки быка-производителя Strout Baxter Fabio-ET характеризовались наиболее высокой средней концентрацией цинка ($64,9$ мг/кг), которая была в среднем в 1,6 раза выше, чем у потомков быка Karona Bonair ($40,3$ мг/кг) и значимо ($p < 0,02$) отличалась от показателей потомков других исследованных быков. Одновременно потомки Strout Baxter Fabio-ET имели самую низкую вариабельность признака ($Cv = 11,3\%$). Полученные данные свидетельствуют о возможности проведения селекции крупного рогатого скота голштинской породы по уровню содержания цинка в мышечной ткани для повышения пищевой ценности говядины.

18. Разработан комплекс регрессионных моделей, позволяющих осуществлять прижизненный неинвазивный прогноз содержания эссенциальных (Fe, Mn, Zn) и токсичного (Cd) элементов в мышечной ткани крупного рогатого скота герефордской породы с использованием гематологических и биохимических показателей крови. Для прогнозирования уровня железа наилучшей является модель, включающая количество эритроцитов (x_3), цветовой показатель (x_6) и глобулин (x_9) ($y = -9,583 + 1,551 \cdot x_3 + 11,503 \cdot x_6 + 0,212 \cdot x_9$), объясняющая 74% дисперсии ($R^2 = 0,74$). Для марганца оптимальна модель, использующая СОЭ (x_5) и глобулин (x_9) ($y = 0,2 - 0,052 \cdot x_5 + 0,002 \cdot x_9$), объясняющая 22,7% дисперсии при кросс-валидации. Для цинка предикторами выступают СОЭ (x_5), цветовой показатель (x_6) и общий холестерин (x_{12}) ($y = 73,576 + 9,409 \cdot x_5 - 14,461 \cdot x_6 - 5,218 \cdot x_{12}$). Модель демонстрирует умеренную объясняющую способность при кросс-валидации ($R^2 = 0,489$). Для кадмия используется модель, основанная на уровне железа в сыворотке крови (x_1) ($y = -9,71 \cdot 10^{-7} + 0,316 \cdot x_1$), объясняющая 38% дисперсии.

19. Установленные количественные взаимосвязи отражают сложные физиологические и метаболические процессы: прямую зависимость содержания железа от эритропоэтических параметров (увеличение количества эритроцитов на $1 \times 10^{12}/л$ и цветового показателя на 1 единицу приводит к росту железа в мышцах на $1,55$ мг/кг и $11,5$ мг/кг соответственно) и уровня

транспортных белков (увеличение глобулина на 1 г/л сопряжено с ростом железа на 0,212 мг/кг); связь уровня марганца с показателями неспецифического воспаления (увеличение СОЭ на 1 мм/ч ведет к снижению марганца на 0,052 мг/кг) и белкового обмена (увеличение глобулина на 1 г/л – к повышению на 0,002 мг/кг); сопряженность уровня цинка с интенсивностью эритропоэза (увеличение цветового показателя на 1 ед. ассоциировано со снижением цинка на 14,46 мг/кг), воспалительными реакциями (увеличение СОЭ на 1 мм/ч – с повышением цинка на 9,41 мг/кг) и липидным обменом (увеличение общего холестерина на 1 ммоль/л – со снижением цинка на 5,22 мг/кг); а также сопряженность между уровнями железа и кадмия, где увеличение уровня железа в сыворотке на 1 ммоль/л, согласно модели, ведёт к росту концентрации кадмия на 0,316 мг/кг. Полученные данные углубляют понимание механизмов регуляции гомеостаза микроэлементов и могут быть использованы для разработки подходов для корректировки норм кормления по микроэлементам и мониторинга состояния животных и повышения безопасности продукции животноводства.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Использовать разработанные региональные, породно- и видоспецифичные референтные интервалы содержания эссенциальных элементов для практической диагностики и мониторинга минерального статуса сельскохозяйственных животных в условиях Западной Сибири.
2. Внедрить в практику методы прижизненного неинвазивного прогнозирования содержания тяжелых металлов в мышечной ткани крупного рогатого скота на основе разработанных регрессионных моделей по гематологическим и биохимическим показателям крови для оперативного мониторинга и оценки безопасности продукции.
3. Включить показатели элементного статуса, учитывая установленное влияние генотипа отцов на содержание цинка в мышечной ткани, в качестве селекционируемых признаков в селекционные программы разведения крупного рогатого скота для повышения пищевой ценности говядины.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Проведенное исследование открывает широкие перспективы для дальнейших научных изысканий в области генетики, элементологии и зоотехнии. Наиболее перспективными направлениями представляются:

Углубленное изучение молекулярно-генетических механизмов. Выявленные межпородные различия и влияние генотипа отцов указывают на необходимость идентификации конкретных генов-кандидатов (металлотранспортеров, металлотионеинов) и их полиморфизмов (SNP), ответственных за аккумуляцию тяжелых металлов. Применение полногеномных ассоциативных исследований (GWAS) и анализа экспрессии генов (RNA-Seq) позволит разработать ДНК-маркеры для селекции животных с оптимальным элементным статусом.

Расширение спектра исследуемых химических элементов (включая другие эссенциальные и токсичные микро- и макроэлементы), пород и видов сельскохозяйственных животных в аналогичных и контрастных эколого-географических условиях для выявления универсальных видо- и породоспецифичных закономерностей элементного обмена.

Детализация влияния комплекса эколого-географических и паратипических факторов (состав почв, воды, кормов, технологии содержания, сезон года, физиологическое состояние) на элементный статус животных, с акцентом на изучение взаимодействия "генотип-среда" и оценку рисков техногенного загрязнения.

Совершенствование и валидация разработанных прогностических моделей на более широких и независимых выборках, включение дополнительных предикторов (элементный состав шерсти, генетические маркеры, показатели продуктивности) и использование более сложных методов машинного обучения для повышения точности и робастности моделей. Разработка аналогичных моделей для других видов животных и тканей.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах ВАК Минобрнауки РФ и работы к ним приравненные

1. Барсукова М. А. Оценка генетического разнообразия скота породы герефорд на основе микросателлитных маркеров / М. А. Барсукова, А. Ф. Петров, **К. Н. Нарожных** // Достижения науки и техники АПК. – 2025. – Т. 39, № 2. – С. 52–57. DOI: 10.53859/02352451_2025_39_2_0.
2. Барсукова, М. А. Мониторинг живой массы племенного скота герефордской породы в условиях пастбищного содержания / М. А. Барсукова, О. А. Иванова, И. А. Афанасьева, М. Л. Кочнева, **К. Н. Нарожных** // Инновации и продовольственная безопасность. – 2024. – № 1(43). – С. 10–19. DOI: 10.31677/2311-0651-2024-43-1-10-19.

3. Барсукова, М. А. Развитие и продуктивность коров породы герефорд по итогам бонитировок / М. А. Барсукова, О. А. Иванова, И. А. Афанасьева, ..., **К. Н. Нарожных** [и др.] // Инновации и продовольственная безопасность. – 2023. – № 4(42). – С. 34–41. DOI: 10.31677/2311-0651-2023-42-4-34-41.
4. Шатохин, К. С. История формирования сибирского чёрно-пёстрого голштинизированного скота (обзор) / К. С. Шатохин, **К. Н. Нарожных**, А. Ф. Петров [и др.] / Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2025. – Т. 26. – № 3. – С. 499–518. DOI: 10.30766/2072-9081.2025.26.3.499-518.
5. **Нарожных, К. Н.** Апробация прижизненного метода оценки уровня железа в мышечной ткани крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных // Зоотехния. – 2024. – № 8. – С. 37–40. DOI: 10.25708/ZT.2024.80.64.009.
6. **Нарожных, К. Н.** Влияние генотипа быков-производителей на концентрацию цинка в мышечной ткани потомства / К. Н. Нарожных // Главный зоотехник. – 2022. – № 5(226). – С. 24–31. DOI: 10.33920/sel-03-2205-03.
7. **Нарожных, К. Н.** Влияние паратипических факторов на уровень цинка в легких бычков герефордской породы в условиях Западной Сибири / К. Н. Нарожных, А. Н. Силованова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2023. – № 1(66). – С. 150–156. DOI: 10.31677/2072-6724-2023-66-1-150-156.
8. **Нарожных, К. Н.** Влияние породной принадлежности на концентрацию цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова, В. Л. Петухов, О. С. Короткевич, О. И. Себежко // Зоотехния. – 2024. – № 3. – С. 38–40. DOI: 10.25708/ZT.2024.95.77.011.
9. **Нарожных, К. Н.** Влияние породной принадлежности на уровень цинка в печени крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова, В. Л. Петухов, О. С. Короткевич, О. И. Себежко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 110. – С. 268–273. DOI: 10.21515/1999-1703-110-268-273.
10. **Нарожных, К. Н.** Влияние эколого-географических условий на концентрацию тяжелых металлов в селезенке герефордского скота, разводимого в условиях Новосибирской области и Алтайского Края / К. Н. Нарожных // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2020. – № 4(57). – С. 111–117. DOI: 10.31677/2072-6724-2020-57-4-111-117.
11. **Нарожных, К. Н.** Модели прогнозирования уровня цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1. – С. 89–103. DOI: 10.26897/0021-342X-2023-1-89-103.

12. **Нарожных, К. Н.** Особенности аккумуляции и распределения тяжелых металлов в органах и тканях герефордского скота / К. Н. Нарожных // Достижения науки и техники АПК. – 2024. – Т. 38. – № 4. – С. 57–62. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_4_57.
13. **Нарожных, К. Н.** Референтные интервалы концентрации микроэлементов в семенниках крупного рогатого скота с учетом паратипических факторов / К. Н. Нарожных // Вестник КрасГАУ. – 2023. – № 6(195). – С. 138–144. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-6-138-144.
14. **Narozhnykh, K.** Development of a predictive model for iron levels in bovine muscle tissue using hair as a predictor / K. Narozhnykh // Animals. – 2024. – Vol. 14, No 7. – Art. 1028. DOI: 10.3390/ani14071028.
15. **Narozhnykh, K.** Interbreed differences in iron concentration in cattle organs and tissues / K. Narozhnykh, V. Petukhov, T. Konovalova, O. Sebezhko, O. Korotkevich // Journal of King Saud University – Science. – 2024. – Vol. 36, No 11. – Art. 103581. DOI 10.1016/j.jksus.2024.103581.
16. **Narozhnykh K. N.** Lead content in soil, water, forage, grains, organs and the muscle tissue of cattle in Western Siberia (Russia) / K.N. Narozhnykh, T.V. Konovalova, J.I. Fedyaev [et al.] // Indian Journal of Ecology. – 2018. – Vol. 45. – № 4. – С. 866-871.
17. **Narozhnykh, K. N.** Prediction models of iron level in beef muscle tissue toward ecological well-being / K. N. Narozhnykh // Global Journal of Environmental Science and Management. – 2023. – Vol. 9, No 4. – P. 833–850. DOI: 10.22034/gjesm.2023.04.13.
18. **Narozhnykh, K. N.** Specific of accumulation of manganese in organs and tissues of Hereford cattle / K. N. Narozhnykh, V. L. Petukhov, A. I. Syso [et al.] // Brazilian Journal of Biology. – 2024. – Vol. 84. – P. e282174. DOI: 10.1590/1519-6984.282174.

Публикации в других научных изданиях

19. Барсукова, М.А. Анализ возрастных различий гематологических признаков скота породы герефорд / М. А. Барсукова, **К. Н. Нарожных**, О. И. Себежко, О.А. Иванова // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2025. – № 2. – С. 84-90. DOI: 10.31857/S2500208225020173.
20. Иванова, О. А. Технологический аудит пастбищного содержания мясного скота / О. А. Иванова, М. А. Барсукова, **К. Н. Нарожных** // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : сборник VIII Всероссийской (национальной) научной конференции с международным

участием, Новосибирск, 25–26 октября 2023 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2023. – С. 988–991.

21. **Нарожных, К. Н.** Влияние эколого-географического фактора на содержание тяжелых металлов в легких герефордского скота / К. Н. Нарожных // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2021. – Т. 51, № 5. – С. 83–90. DOI: 10.26898/0370-8799-2021-5-9.

22. **Нарожных, К. Н.** Математическое моделирование уровня марганца в мышечной ткани крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53, № 4. – С. 81–92. – DOI: 10.26898/0370-8799-2023-4-9.

23. **Нарожных, К. Н.** Влияние генетических факторов на уровень цинка в мышечной ткани крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных // Теория и практика современной аграрной науки : сборник VII национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 27-28 февраля 2024 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2024. – С. 413–415.

24. **Нарожных, К. Н.** Влияние эколого-географических условий на концентрацию марганца и железа в селезенке герефордского скота в условиях некоторых районов Новосибирской области и Алтайского Края / К. Н. Нарожных // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : Сборник V Всероссийской (национальной) научной конференции, Новосибирск, 26 ноября 2020 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2020. – С. 519–522.

25. **Нарожных, К. Н.** Воздействие паратипических факторов на уровень марганца в сердце крупного рогатого скота в условиях юга Западной Сибири / К. Н. Нарожных, А. Н. Силованова // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике : Материалы XXI Международной научно-практической конференции, Каменново, 01-02 декабря 2022 года. – Каменново : ФГБНУ СибНИИРС - филиал ИЦиГ СО РАН, 2022. – С. 280–284.

26. **Нарожных, К. Н.** Воздействие эколого-географического фактора на уровень железа в почках крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных, А. Н. Силованова // Развитие биотехнологии: новая реальность : сборник материалов Международной научно-практической конференции, приуроченной к 100-летию юбилею Почётного ректора НГАУ, профессора, доктора сельскохозяйственных наук И. И. Гудилина, Новосибирск, 14–15 сентября 2022 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2022. – С. 112–115.

27. **Нарожных, К. Н.** Межпородные различия в аккумуляции тяжелых металлов в селезенке у быков / К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова // Пища. Экология. Качество : труды XVII Международной научно-практической конференции, Екатеринбург-Москва, 15–30 апреля 2020 года. – Краснообск : СФНЦА РАН, 2020. – С. 442–443.
28. **Нарожных, К. Н.** Межпородные различия по содержанию кадмия в селезенке у крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири / К. Н. Нарожных, Г. Ш. Махмудова // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : Сборник VI Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 25–26 ноября 2021 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2021. – С. 658–661.
29. **Нарожных, К. Н.** Содержание меди в волосе разных пород крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных, Ю. И. Федяев, Т. В. Коновалова // Теория и практика современной аграрной науки : сборник II Национальной (всероссийской) научной конференции, Новосибирск, 28 февраля 2019 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2019. – С. 332–335.
30. **Нарожных, К. Н.** Содержание цинка в мясе быков герефордской и голштинской пород / К. Н. Нарожных, Ю. И. Федяев, Т. В. Коновалова // Пища. Экология. Качество : Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, Москва-Барнаул, 18–20 марта 2019 года : в 2 т. – Барнаул : Алтайский государственный университет, 2019. – Т. 1. – С. 85–87.
31. Петухов, В. Л. Элементный состав производных кожи животных как показатель содержания тяжелых металлов в организме / В. Л. Петухов, О. И. Себежко, Ю. И. Федяев, О. С. Короткевич, **К. Н. Нарожных** // Теория и практика современной аграрной науки : сборник II Национальной (всероссийской) научной конференции, Новосибирск, 28 февраля 2019 года. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2019. – С. 342–343.
32. **Narozhnykh, K. N.** Manganese content in muscles of sons of different Holstein bulls reared in Western Siberia / K. N. Narozhnykh, O. I. Sebezshko, T. V. Konovalova [et al.] // Trace Elements and Electrolytes. – 2021. – Vol. 38, No 3. – P. 149. DOI: 10.5414/tex01689.
33. **Narozhnykh, K. N.** Copper concentrations in the lungs of Hereford steer on farms in Western Siberia / K. N. Narozhnykh, T. V. Konovalova, O. I. Sebezshko, V. L. Petukhov, O. S. Korotkevich // Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community : Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference, Stavropol, 28 April 2022. – Stavropol : Stavropol State Agrarian University, 2022. – Art. 100002.
34. **Narozhnykh, K. N.** Reference intervals of heavy metals in the muscle tissue of cattle considering paratypic factors / K. N. Narozhnykh // International Scientific

Agriculture Symposium "AGROSYM 2023", Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 05-08 October 2023 : Book of Proceedings. – East Sarajevo : University of East Sarajevo, Faculty of Agriculture, 2023. – P. 948–954.

Патенты и свидетельства на базы данных

35. Аккумуляция тяжелых металлов в волосе крупного рогатого скота герефордской породы : база данных / **К. Н. Нарожных**, А. Ф. Петров, В. Л. Петухов ; заявитель и правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Новосиб. гос. аграр. ун-т". – № 2024620939 ; заявл. 19.03.2024 ; зарегистрировано в Реестре баз данных 26.03.2024.

36. База данных генеалогической структуры быков голштинской породы канадского происхождения / А. Ф. Петров, Е. В. Камалдинов, **К. Н. Нарожных** ; заявитель и правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Новосиб. гос. аграр. ун-т". – № 2024624918 ; заявл. 01.11.2024 ; зарегистрировано в Реестре баз данных 14.11.2024.

37. Генетическое разнообразие скота породы герефорд Западной Сибири по микросателлитным локусам : база данных / М. А. Барсукова, А. Ф. Петров, **К. Н. Нарожных** ; заявитель и правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Новосиб. гос. аграр. ун-т". – № 2024624910 ; заявл. 01.11.2024 ; зарегистрировано в Реестре баз данных 14.11.2024.

38. Способ оценки кадмия в мышечной ткани крупного рогатого скота : пат. 2758902 С1 Рос. Федерация : МПК G 01 N 33/48 / **К. Н. Нарожных**, Э. С. Соколова, Т. В. Коновалова [и др.] ; заявитель и патентообладатель Новосибир. гос. аграр. Ун-т. – № 2020124521 ; заявл. 14.07.2020 ; опубл. 02.11.2021, Бюл. № 31. – 6 с.