

Коновалова Татьяна Валерьевна

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ, СОПРЯЖЕННОСТЬ И НАСЛЕДСТВЕННАЯ
ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОРГАНАХ И
ТКАНЯХ У КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Специальность: 4.2.5 – Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Новосибирск 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий»

Научные руководители:

доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН
Александр Семенович Донченко

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик
НАН Беларуси **Шейко Иван Павлович**

Официальный оппоненты:

Абилов Ахмедага Имаш оглы,
доктор биологических наук, профессор,
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста»,
главный научный сотрудник лаборатории клеточной
инженерии

Семенютин Владимир Владимирович,
доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Белгородский государственный аграрный университет
имени В.Я. Горина», профессор кафедры морфологии,
физиологии, инфекционной и инвазионной патологии

Ведущая организация -

ФГБОУ ВО Иркутский государственный аграрный
университет имени А.А. Ежевского

Защита диссертации состоится « 16 » октября 2026 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 35.2.025.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий», по адресу: 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий» и на сайте <https://edubiotech.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маренков Владимир Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований и степень разработанности выбранной темы.

Стратегия развития агропромышленного комплекса и Доктрина продовольственной безопасности РФ (Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20) предусматривают переход к высокопродуктивному животноводству, основанному на мобилизации собственных племенных ресурсов, сохранении уникальных локальных пород и отечественного генофонда (Улимбашев и др., 2024; Сайфетдинов и др., 2025). Приоритетным направлением Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий на 2019–2030 годы (Постановление Правительства РФ от 22.04.2019 № 479) является создание генотипов животных, устойчивых к неблагоприятным факторам среды, обладающих повышенной продуктивностью и улучшенными качественными характеристиками продукции (Донник и др., 2015; Донченко, 2018; Сысо и др., 2018). Результаты исследований по созданию высокопродуктивных генотипов сельскохозяйственных животных, совершенствованию технологий кормоприготовления и ветеринарному обеспечению создают научную основу для повышения эффективности животноводства в условиях различных экологических зон и созданию продовольственной независимости (Солошенко и др., 2016, 2023). Роль и место животноводства в обеспечении продовольственной безопасности России определяется его стратегическим значением для формирования внутреннего продовольственного рынка и снижения импортозависимости (Амерханов, 2024).

В условиях интенсификации скотоводства и изменения биогеохимических провинций особое значение приобретает изучение элементного статуса сельскохозяйственных животных как комплексного интерьерного признака, отражающего генетический потенциал и адаптивные возможности организма (Абилов и др., 2021, 2023; Донник и др., 2001, 2015; Зиновьева и др., 2019). Регулирование гомеостаза химических элементов в организме сформировано в процессе эволюции и осуществляется за счёт генетических механизмов, определяющих активность транспортных систем, синтез металлсвязывающих белков и ферментов детоксикации (Tillquist and et al., 2020). Межпородная и внутripородная изменчивость по микроэлементному статусу является не просто следствием экологических условий, а отражением полиморфизма генов, контролирующих метаболические пути элементов, что создаёт фундамент для целенаправленной селекции (Fankun Zhou et al., 2020; Manisalidis and et al., 2020).

Микроэлементы оказывают многостороннее воздействие на биохимические, физиологические и иммунологические реакции в организме животных (Агаджанян, 2001; Скальный, Рудаков, 2005; Оберлис, 2008). Научные основы нормирования микроэлементов в рационах крупного рогатого скота, обеспечивающие оптимальный минеральный обмен и продуктивность животных, были заложены в фундаментальных исследованиях отечественных учёных (Скуковский, 1980). При этом тяжёлые металлы и эссенциальные микроэлементы следует рассматривать не только с позиций ветеринарной токсикологии, но и как важнейшие биологические маркеры, интегрально отражающие интенсивность обменных процессов и резистентность организма к экзогенным воздействиям (Мирошников, 2018; Schwarz, 2013). Отклонения в уровнях элементов, вызванные дисбалансом эссенциальных микроэлементов и антропогенными воздействиями, достоверно связаны со снижением естественной резистентности, ростом заболеваемости и падением продуктивности животных (Camaschella, 2015).

Барьерно-накопительные функции органов и тканей, определяющие специфику депонирования химических элементов, имеют строгую генетическую детерминацию. Это обуславливает существование значительной межиндивидуальной изменчивости в аккумуляции как эссенциальных, так и токсичных металлов, которая может и должна служить базисом для селекционно-племенной работы. Вместе с тем стандартные геномные индексы, ориентированные преимущественно на молочную и мясную

продуктивность, не всегда в полной мере отражают адаптивные возможности животных к факторам среды, включая биогеохимическую нагрузку (Басонов и др., 2024; Мурленков, Шендаков, 2025). Включение интерьерных биомаркеров минерального обмена в комплексные селекционные индексы позволит повысить эффективность оценки производителей и сформировать стада, устойчивые к неблагоприятным факторам среды (Шейко, 2021; Улимбашев и др., 2024).

Изучение влияния генотипа быков-производителей на микроэлементный статус потомства открывает новые возможности для отбора животных с оптимальным минеральным гомеостазом. Практика межпородного скрещивания убедительно демонстрирует, что генотип быка оказывает достоверное влияние на широкий спектр признаков потомства, включая адаптивность и резистентность к экотоксикантам (Мкртчян и др., 2021; Текеев и др., 2025). Комплексный анализ состояния скотоводства подтверждает острую необходимость мобилизации собственных племенных ресурсов и внедрения дополнительных селекционных критериев, направленных на сохранение и рациональное использование уникальных локальных пород и отечественного генофонда (Дунин, 2025; Казаровец и др., 2023).

При этом мировое скотоводство характеризуется значительным разнообразием породных ресурсов и региональных систем разведения, что обуславливает необходимость учёта зарубежного опыта при формировании отечественных селекционных программ (Данкверт и др., 2007).

Однако вопросы наследственной обусловленности барьерно-накопительных функций органов и тканей по отношению к тяжёлым металлам пока остаются недостаточно изученными и слабо интегрированными в селекционно-племенную работу. Недостаточно исследованы корреляции элементов внутри органов и между ними, а также их ассоциации с гематологическими, биохимическими и цитогенетическими показателями. Требуется исследование параметров концентрации тяжёлых металлов с учётом биогеохимических провинций, особенностей породы, генотипа производителей, периода онтогенеза, условий кормления и содержания (Мирошников и др., 2016; Радыш и др., 2017; Калашников и др., 2017). Разработка неинвазивных и малоинвазивных методов прижизненной оценки степени аккумуляции тяжёлых металлов, основанных на использовании производных кожи и биохимических маркеров крови, представляет собой приоритетное направление, открывающее возможности для ранней диагностики и селекционного отбора (Завьялов, 2020; Фролов, 2021).

Таким образом, комплексная оценка фенофона и генофона разводимых пород крупного рогатого скота с целью применения селекционно-генетических механизмов, использование микроэлементного статуса в качестве интерьерного маркера в племенной ценности и разработка биотехнологических подходов к отбору животных, устойчивых к экотоксикантам, является высокоактуальной научной и практической задачей.

Степень разработанности темы

Изменения экологической обстановки определяют необходимость постоянного мониторинга концентрации тяжёлых металлов в окружающей среде и живых организмах (Скальный и др., 2009; Tchounwou and et al., 2012; Manisalidis and et al., 2020). Фундаментальные исследования отечественной школы биоэлементологии (С.А. Мирошников, А.Е. Калашников, А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, К.Н. Нарожных и др.) заложили практическую и биотехнологическую основу для изучения накопления и распределения макро- и микроэлементов в организме сельскохозяйственных животных (Завьялов, 2021; Фролов, 2021; Мирошников и др., 2016). Экспериментально доказано влияние генотипа отцов на метаболизм химических элементов и продуктивность животных, на основе элементного состава шерсти разработаны и запатентованы способы зоотехнического отбора (Мирошников и др., 2017–2021).

Вместе с тем мало изучены взаимосвязи элементов в пределах органов и тканей и между ними, а также их корреляции с гематологическими, биохимическими и

цитогенетическими показателями. Не получены однозначные результаты о степени наследственной обусловленности уровня элементов у крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири. Эффект генотипа быков-производителей на формирование устойчивости или предрасположенности потомства к накоплению тяжёлых металлов практически не исследован. Межпородные различия в устойчивости к аккумуляции тяжёлых металлов изучены фрагментарно. Актуальной остаётся разработка неинвазивных и малоинвазивных методов прижизненной оценки степени аккумуляции тяжёлых металлов для использования в селекционной работе.

Финансовая поддержка Российского научного фонда (грант №15-16-30003) обеспечила реализацию проекта по разработке системы комплексного мониторинга агроэкосистем Сибири, направленного на получение экологически безопасной продукции. Дополнительное финансирование было получено в рамках госбюджетной тематики «Изучение генофонда и фенофонда пород сельскохозяйственных животных в Сибири» (РК № 01201362239).

Цель исследования – изучение фенофонда крупного рогатого скота черно-пестрой породы по уровню содержания и изменчивости тяжелых металлов в органах и тканях животных, описание их корреляции с некоторыми биохимическими, гематологическими и цитогенетическими показателями, оценка наследственной обусловленности аккумуляции меди в органах и мышечной ткани, а также определение межпородных различий уровня меди и перспективы использования полученных данных в селекционной работе.

В задачи исследований входило:

1. Изучить содержание, фенотипическую изменчивость, референсные значения эссенциальных микроэлементов и основных экотоксикантов в органах и тканях крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири.
2. Охарактеризовать корреляции уровней химических элементов с биохимическими показателями крови и внутриорганного, а также межорганного распределения тяжелых металлов для поиска критериев косвенной оценки микроэлементного статуса животных.
3. Исследовать влияние генотипа быков-производителей на аккумуляцию меди в органах и мышечной ткани потомков для оценки наследственной обусловленности уровня депонирования данного микроэлемента и использования полученных результатов в селекционных программах.
4. Выявить межпородные различия по концентрации меди в мышечной ткани животных.
5. Определить ассоциации соматической хромосомной нестабильности с уровнем тяжелых металлов в органах и тканях для оценки генетического здоровья популяций.
6. Разработать комплекс малоинвазивных и неинвазивных методов диагностики аккумуляции тяжелых металлов с целью получения экологически безопасной продукции и прижизненной оценки генотипа производителей по устойчивости и восприимчивости потомства к аккумуляции тяжелых металлов в органах и тканях.

Научная новизна. Впервые дана характеристика фенофонда крупного-рогатого скота в условиях Западной Сибири по уровню эссенциальных микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Mn) и экотоксикантов (Pb, Cd) в органах и тканях животных, которые могут использоваться для комплексной оценки интерьера.

Выявлены закономерности изменчивости и избирательности в аккумуляции химических элементов в органах, тканях и производных кожи животных. Показаны различия в корреляциях микроэлементов как внутри, так и между органами и тканями. Установлено, что между уровнями одних и тех же тяжелых металлов в органах и тканях связь может изменяться не только по силе, но и направлению.

Выявлено влияние генотипа быков-производителей и генофонда пород на содержание меди в органах и мышечной ткани потомков, что открывает возможность путем селекции оптимизировать ее количество в организме.

Установлены изменения сопряженности между уровнем тяжелых металлов в органах и тканях с частотой соматической хромосомной нестабильности.

Предложены методы прижизненной диагностики уровня кадмия и свинца в органах и мышечной ткани животных, которые могут быть использованы в селекционной работе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Установлены средние уровни и референсные значения микроэлементов (Fe, Cu, Mn, Zn) и экотоксикантов (Pb и Cd) в различных органах и тканях крупного рогатого скота, которые могут быть включены в оценку фенофона породы. Эти данные могут быть использованы для оценки интерьера по минеральному статусу и здоровья животных, а также для экологического мониторинга популяций.

Разработаны методы прижизненной малоинвазивной оценки накопления некоторых тяжелых металлов в органах и тканях животных - патенты (№ 2421726, № 2602915, № 2426119).

Определены различия в содержании меди в мышечной ткани разных пород. Установленное влияние генотипа быков-производителей на устойчивость и восприимчивость потомства к содержанию меди в органах и мышечной ткани можно использовать в селекционных программах. Выявлены разные по величине и направлению связи между уровнем тяжелых металлов в органах и тканях с показателями соматической хромосомной нестабильности, что позволяет оценить их влияние на цитогенетический статус животных.

Полученные результаты могут быть использованы для комплексной оценки интерьера сельскохозяйственных животных по гематологическим, биохимическим, физико-химическим и цитогенетическим показателям, а также для дополнительной характеристики быков-производителей по устойчивости и восприимчивости потомства к накоплению тяжелых металлов.

Результаты научных исследований используются в учебном процессе для чтения лекций и проведения лабораторно-практических занятий по различным курсам, таким как «Разведение сельскохозяйственных животных», «Генетика», «Экология», «Частное животноводство» и «Биохимия».

Методология и методы исследования. Для определения содержания тяжелых металлов в органах и тканях применялись: атомно-абсорбционная спектрометрия с использованием электротермической и пламенной атомизации и атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. Для комплексной оценки фенофона крупного рогатого скота молочного направления продуктивности использовались гематологические, биохимические, физико-химические, цитогенетические, селекционно-генетические, агрохимические и статистические методы исследований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Установленные референсные значения и закономерности тканеспецифичного распределения и изменчивости эссенциальных (Fe, Cu, Zn, Mn) и токсичных (Pb, Cd) элементов в органах и тканях крупного рогатого скота отражают функциональную специализацию органов-депо и служат объективными индикаторами фенофона породы в биогеохимических условиях Западной Сибири. Характеристика гематологического статуса животных подтверждает нахождение показателей преимущественно в пределах физиологической нормы, при этом выявленная прямая сопряженность аккумуляции свинца в селезенке с изменением цветного показателя крови доказывает влияние экотоксикантов на процессы эритропоэза.
2. Устойчивые внутриорганные и межорганные корреляционные плеяды тяжелых металлов, а также их ассоциации с биохимическими маркерами сыворотки крови (активность щелочной фосфатазы, ЛДГ) отражают системные метаболические сдвиги и формируют базу для косвенной прижизненной оценки элементного гомеостаза.
3. Наследственная обусловленность микроэлементного статуса потомства, проявляющаяся в достоверном влиянии генотипа быков-производителей на уровень

депонирования меди в печени, почках и мышечной ткани, что обосновывает возможность селекции на оптимизацию микроэлементного статуса.

4. Межпородная дифференциация (черно-пестрая, голштинская и герефордская породы) определяет существенные различия в способности к аккумуляции меди в мышечной ткани, доказывая высокую долю генетической детерминации данного интерьерного признака.

5. Генотоксическое действие поллютантов, подтвержденное прямой ассоциацией между накоплением кадмия и меди в паренхиматозных органах и ростом частоты соматической хромосомной нестабильности (полиплоидии, гипоплоидии), что обосновывает возможность использования цитогенетического скрининга для мониторинга популяций.

6. Комплекс запатентованных малоинвазивных методов и регрессионных моделей прижизненной диагностики уровня аккумуляции тяжелых металлов (свинца и кадмия в селезенке, легких и мышечной ткани) по элементному составу волоса и сыворотки крови выступает в качестве скринингового инструмента для экологического контроля и селекционно-племенной работе для оценки генотипа производителей по резистентности и восприимчивости потомства к содержанию тяжелых металлов в органах и тканях.

Личный вклад диссертанта. Автор принимал непосредственное участие в определении целей и задач исследования, организации командировок для сбора биоматериала, выполнении предварительных этапов лабораторных исследований, в проведении исследований, за исключением случаев, отмеченных в диссертации и автореферате, обработке полученных данных и их анализе, выступлениях на конференциях и подготовке публикаций.

Степень достоверности и апробация результатов исследований. Было проведено более 2000 анализов, включая гематологические, биохимические, цитогенетические, физико-химические и агрохимические методы исследования. Материалы диссертации в составе коллектива авторов (О.И. Себежко, А.И. Желтиков, К.Н. Нарожных, Т.В. Коновалова, В.Л. Петухов и др.) были представлены на соискание Государственной премии Новосибирской области в области науки и техники (2021). Премия была присуждена «За разработку и практическую реализацию селекционно-генетических и биотехнологических методов совершенствования пород и типов животных, оценку их генофонда с целью импортозамещения и получения экологически безопасных продуктов питания». Результаты экспериментов представлены на ряде международных и национальных конференций, включая 17th International Conference of Heavy Metals in the Environment (Китай, 2014), а также на международной конференции "33. Joint Annual Meeting of the German Society for Minerals and Trace Elements (GMS) with Zinc-UK and Zinc-Net COST Training School Zinc and other Transition Metals in Health and Disease" (Германия, 2017). Также представлены наши исследования на российских конференциях, таких как "Современные проблемы экологии" (Тула, 2015), "Аграрная наука - сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии" (Краснообск, 2017), "Кормопроизводство, продуктивность, долголетие и благополучие животных" (Новосибирск, 2018), "Пища. Экология. Качество" (Барнаул, 2019), а также на городской научно-практической конференции "Progress through innovation" (Новосибирск, 2014). Приняли участие во всероссийских национальных конференциях, включая "Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий" (Новосибирск, 2019) и "Теория и практика современной аграрной науки" (Новосибирск, 2019; 2023).

Публикации. Из более чем 80 статей 29 работ опубликовано по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и других изданиях, в том числе рекомендованных ВАК 9 – «Вестник НГАУ», «Главный зоотехник», «Journal of Trace Elements in Medicine and Biology», «Indian Journal of Ecology» и «ICHMET Trace Elements and Electrolytes E3S Web of Conferences, Rome, Italy», «Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences». Получено 3 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 201 страницах компьютерного текста, содержит 47 таблиц и 8 рисунков. Диссертация включает обзор литературы, материалы и методы, результаты исследований, обсуждение, заключение, предложения, перспективы дальнейшей разработки темы. Список используемой литературы составил 375 источник, из них 133 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор литературы

В главе представлен обзор генетических, гематологических, биохимических, физиологических и цитогенетических аспектов минерального обмена у крупного рогатого скота. Элементный статус (Fe, Zn, Cu, Mn, Pb, Cd) рассмотрен как комплексные интерьерные показатели адаптивности и оценки племенной ценности животных. Проанализированы современные данные по молекулярной генетике минерального обмена и наследуемости признаков. Обоснована роль генотипа быков-производителей и породной принадлежности в формировании микроэлементного гомеостаза потомства. Показана эффективность использования цитогенетических маркеров, неинвазивных биотехнологических подходов для прижизненной оценки производителей по качеству потомства и получения экологически безопасной продукции.

2. Материалы и методы исследований

Исследования проведены в Новосибирской и Кемеровской областях на бычках черно-пестрой, голштинской и герефордской пород в возрасте 13–14 месяцев. Формирование выборки осуществлялось со строгим соблюдением этических норм, регламентированных Международными рекомендациями по проведению медико-биологических исследований с использованием животных. Кормление и содержание животных осуществлялись в соответствии с зоотехническими нормативами.

Материалом для исследования послужили образцы мышечной ткани, паренхиматозных органов (печень, почки, селезенка, легкие, сердце), цельной крови, сыворотки крови и волосяного покрова, полученные от клинически здоровых животных (всего 330 проб от 30 бычков). Особое внимание было уделено изучению влияния генотипа быков-производителей голштинской породы (n=34) на тканеспецифичную устойчивость и предрасположенность потомства к аккумуляции меди.

Концентрации химических элементов (Cd, Pb, Cu, Mn, Zn, Fe) в тканях и органах определялись методами атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на спектрометрах SOLAAR M6 и Perkin-Elmer Zeeman/3030, а также атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) на iCAP 6500 (Thermo Scientific) в сертифицированных аналитических центрах. Анализ волосяного покрова проводили по оригинальной методике спектрального анализа после стандартизированной кислотной и микроволновой пробоподготовки. Для элиминирования фактора внешней среды образцы кормов, почвы и воды также анализировались на содержание элементов (данные ИПА СО РАН).

Оценка интерьерного статуса включала гематологические исследования (число эритроцитов и лейкоцитов, гемоглобин, СОЭ) и биохимический анализ сыворотки крови (общий белок, глюкоза, мочевины, холестерин, билирубин, активность АЛТ и АСТ), выполненные на автоматическом анализаторе Photometer 5010.

Цитогенетический анализ соматической хромосомной нестабильности проводился на лимфоцитах периферической крови, активированных фитогемагглютинином, по методу Р. Moorhead с модификациями М.Л. Кочневой. Оценивались уровень диплоидии, анеуплоидия, полиплоидия, фрагментация хромосом, межхромосомные обмены и интегральные показатели цитогенетического гомеостаза.



Рисунок 1- Схема исследований

Статистическая обработка данных выполнена в среде R (версия 4.5.3). Для решения задач генетики и селекции применялись специализированные биометрические подходы: оценку генетической детерминации признаков (долю влияния генотипа быков-производителей и породной принадлежности) проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с расчётом показателя силы влияния (r_w) и апостериорным парным сравнением групп тестом Тьюки. Для разработки алгоритмов прижизненной неинвазивной диагностики применяли регрессионный анализ с процедурой кросс-валидации.

При отклонении распределения данных от нормального закона (критерий Шапиро-Уилка) использовали непараметрические критерии Манна-Уитни, Уилкоксона и Краскала-Уоллиса с апостериорным тестом Данна с коррекцией Холма. Сопряженность признаков оценивали коэффициентами корреляции Пирсона и Спирмена. Степень системной аккумуляции элементов рассчитывали с использованием интегрированного коэффициента (R_i) по формуле:

$$R_i = 1 - \frac{\sum R}{m \cdot n},$$

(1)

где $\sum R$ – сумма рангов изучаемых признаков; m – число ранжируемых признаков; n – число членов выборки (Дегтярев, 2024).

Ряд исследований выполнен совместно с Короткевич О.С., Себежко О.И., Нарожных К.Н.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Биогеохимическая характеристика территории разведения как основа для оценки генетической детерминации элементного статуса животных

В каждой селекционно-племенной работе важно учитывать эколого-климатические и агрохимические условия среды. Были проанализированы данные биогеохимического мониторинга (2010–2022 гг.) о содержании тяжёлых металлов в почве, воде, зерне и грубых кормах в Западной Сибири (Новосибирская область и Кузбасс). Материалы исследования были получены в Институте почвоведения и агрохимии СО РАН и

опубликованы совместно с А.И. Сысо и К.Н. Нарожных (Syso et al., 2017; Petukhov et al., 2016; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017b, 2018).

Превышение максимально допустимых уровней (МДУ) и предельно допустимых концентраций (ПДК) по исследованным элементам в кормах Новосибирской области не выявлено. В грубых кормах доминирует железо (49,0–86,0 мг/кг), концентрация которого в сене бобовых трав выше, чем в злаковых. Содержание цинка в сене составляет 17,0–27,0 мг/кг, меди — 4,0–9,0 мг/кг, марганца — 20,0–54,0 мг/кг. Наименьшие значения характерны для кадмия (0,1–0,2 мг/кг) и свинца (0,8–1,5 мг/кг). Ранжированный ряд по содержанию элементов в грубых кормах имеет вид: Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Cd. Аналогичные закономерности выявлены в почвах и кормовых травах Барнаульского Приобья.

Сравнительный анализ регионов показал, что концентрация кадмия в зерне из Кузбасса (0,171 мг/кг) статистически достоверно ($P < 0,05$) превышает показатели Новосибирской области (0,015 мг/кг), однако в обоих регионах она не превышает ПДК (0,5 мг/кг). В сельскохозяйственных зонах, где развито животноводство, концентрации тяжёлых металлов в почве и кормах находятся в пределах допустимых значений. Не зафиксировано радиоактивного загрязнения цезием-137 и стронцием-90.

Таким образом, установленный стабильный биогеохимический фон создаёт оптимальные условия для проявления аддитивных генетических эффектов и позволяет трактовать вариацию содержания тяжёлых металлов и эссенциальных элементов в органах и тканях подопытного скота как реализацию генетического потенциала по минеральному обмену, а не как следствие экологического стресса.

3.2. Фенотипическая изменчивость содержания тяжёлых металлов в органах и тканях крупного рогатого скота как комплекса интерьерных признаков

В оценке интерьера и фенофона животных важное место занимает элементный состав органов и тканей. Установлены средние концентрации и параметры фенотипической изменчивости содержания тяжёлых металлов (Cd, Pb) и эссенциальных микроэлементов (Fe, Zn, Cu, Mn) в мышцах, миокарде, печени, почках, лёгких, селезёнке и волосах бычков черно-пёстрой породы.

Анализ распределения уровней элементов выявляет устойчивый тканеспецифический порядок их накопления. Для печени, лёгких и селезёнки установлен единый ранжированный ряд по возрастанию средних концентраций: Cd < Pb < Mn < Cu < Zn < Fe. Для мышечной ткани ряд имеет вид: Cd < Pb < Mn < Cu < Fe < Zn, поскольку содержание цинка (52,99 мг/кг) незначительно превышает уровень железа (50,88 мг/кг). Исключение составляют волосы, миокард и почки: для волос – Cd < Cu < Mn < Fe < Zn; для миокарда – Cd < Mn < Pb < Cu < Zn < Fe; для почек – Pb < Cd < Mn < Cu < Zn < Fe. Установлено, что распределение элементов зависит от места локализации. Минимальный показатель отмечен у кадмия в селезёнке, тогда как его значение в почечной ткани выше почти в 68 раз (таблица 1).

Таблица 1 — Содержание тяжёлых металлов в органах и тканях крупного рогатого скота, мг/кг

Орган, ткань	Pb	Cd	Fe	Zn	Cu	Mn
Мышцы	0,070±0,013	0,015±0,001	50,88±2,61	52,99±1,24	1,57±0,06	0,42±0,03
Волос	-	0,013±0,001	25,95±2,22	96,41±1,01	7,39±0,20	9,73±0,46
Сердце	0,830±0,100	0,002±0,0002	72,07±1,82	20,65±0,52	4,55±0,08	0,51±0,02
Печень	0,40±0,05	0,020±0,00	68,29±3,90	33,76±0,91	8,99±1,10	3,00±0,06
Почки	0,044±0,004	0,129±0,014	55,01±2,80	19,60±1,21	3,22±0,19	0,99±0,03
Легкие	0,169±0,016	0,004±0,0001	212,53±13,14	20,23±0,50	1,33±0,05	0,45±0,06
Селезенка	0,028±0,004	0,0019±0,0001	495,79±36,12	16,09±0,27	0,79±0,01	0,24±0,01

Максимальное содержание Fe зафиксировано в селезёнке (495,79 мг/кг) и лёгких (212,53 мг/кг), что обусловлено их гематологической и дыхательной специализацией; эти

данные соответствуют выводам Нарожных и др. (2018), где подчёркивается значимость селезёнки как депо железа. Наибольшие значения Zn – в волосах (96,41 мг/кг) и мышцах (52,99 мг/кг), что согласуется с результатами Коноваловой и др. (2017а), где указано, что волосы служат индикатором накопления цинка. Максимальная концентрация Cu зарегистрирована в печени (8,99 мг/кг), что совпадает с выводами Сысо и др. (2017а), подчёркивающих роль печени в метаболизме меди. Cd – в почках (0,129 мг/кг), что подтверждает исследования Kim et al. (2016), отмечающие склонность кадмия к биоаккумуляции в почечной ткани. Pb – в сердце (0,83 мг/кг) и печени (0,40 мг/кг), что согласуется с данными Andjelkovic et al. (2019), где сообщается о склонности свинца к накоплению в органах с высоким кровоснабжением. Наибольшая концентрация Mn обнаружена в волосе (9,73 мг/кг), что также указывает на значимость данной матрицы как индикатора накопления микроэлементов (Фролов, 2021).

Фенотипическая изменчивость уровней экотоксикантов (Cd и Pb) во всех изученных органах была высокой ($C_v = 25\text{--}70\%$) и значительно превышала вариабельность эссенциальных элементов ($C_v = 9,8\text{--}35,8\%$), что свидетельствует о более жёстком гомеостатическом контроле над нутриентами и создаёт предпосылки для селекционного отбора по признакам барьерно-накопительной функции. Выявлена выраженная межпородная дифференциация элементного статуса (в сравнении с герефордской породой), подтверждающая генетическую детерминацию депонирования элементов (Нарожных, 2019).

В связи с выраженной метаболической гетерогенностью тканей для комплексной оценки барьерно-накопительной функции применён метод ранжирования с вычислением интегрального коэффициента аккумуляции (R_i). Для выявления главных системных резервуаров микроэлементов в организме вычислены интегральные коэффициенты аккумуляции эссенциальных элементов (таблица 2).

Таблица 2 — Ранжирование органов и тканей по содержанию эссенциальных элементов

Орган, ткань	Fe	Zn	Cu	Mn	R_i
Мышцы	6	2	5	6	0,32
Волос	7	1	2	1	0,54
Сердце	3	4	3	4	0,50
Печень	4	3	1	2	0,68
Почки	5	6	4	3	0,39
Легкие	2	5	6	5	0,36
Селезенка	1	7	7	7	0,21

* R_i -интегрированный коэффициент аккумуляции

Ранжированный ряд органов по убыванию интегрального коэффициента аккумуляции имеет следующий вид: печень (0,68) > волосы (0,54) > сердце (0,50) > почки (0,39) > лёгкие (0,36) > мышцы (0,32) > селезёнка (0,21). Максимальное депонирование эссенциальных элементов отмечено в печени и волосах, минимальное — в селезёнке. Высокий интегральный ранг волос (0,54), уступающий только печени, подтверждает их надёжность как прокси-маркера для оценки общего минерального статуса животного.

Волосистой покров выступает как уникальный неинвазивный биомаркер, ретроспективно отражающий минеральный статус организма в период роста волоса в фолликуле (Нарожных, Купцов, 2015; Завьялов, 2020; Фролов и др., 2025а). В волосах максимально аккумулируется цинк (96,41 мг/кг), что обусловлено высоким сродством кератиновых тиольных групп к ионам Zn (Beernaert et al., 2007; McLean et al., 2009). Межпородные различия служат прямым доказательством генетического контроля минерального обмена: так, значения меди в волосе у герефордской и черно-пёстрой пород достоверно различаются (Нарожных и др., 2019). Аналогично, видовая специфика отражается в металлопрофиле: у лошадей уровень цинка в гриве в 1,6 раза, меди – в 1,5 раза, а марганца – в 2,8 раза выше, чем у бычков черно-пёстрой породы (Brummer-Holder et al., 2020). Полученные данные демонстрируют вариативность накопления

микроэлементов, обусловленную физиологической специализацией органов, и обосновывают возможность использования элементного статуса тканей, включая волос, в качестве интерьерных маркеров в селекционно-племенной работе.

3.3. Гематологические и биохимические показатели как основа оценки реализации генетического потенциала и адаптивной пластичности быков черно-пестрой породы

Оценка гематологического, биохимического и ферментного статусов крови в совокупности с элементным составом органов и тканей позволяет комплексно судить о реализации генетического потенциала и адаптивной пластичности животных (Себежко и др., 2023а; Шейко, 2021). У быков черно-пестрой породы гематологические показатели (эритроциты $6,97 \pm 0,18 \times 10^{12}/л$, лейкоциты $7,67 \pm 0,60 \times 10^9/л$, гемоглобин $130,30 \pm 3,34$ г/л) находятся в пределах физиологической нормы, за исключением гемоглобина и цветного показателя, незначительное превышение которых интерпретируется как генетически обусловленная адаптивная реакция на климат Западной Сибири. Биохимический профиль характеризуется преобладанием анаболических процессов (коэффициент де Ритиса 0,92), вариабельностью активности щелочной фосфатазы как породоспецифического маркера и отсутствием метаболического стресса (Рослый, 2015; Васильева, Конопатов, 2017; Гудилин и др., 2000). Установлено, что генотип быков-производителей достоверно влияет на уровень мочевины у потомства (Себежко и др., 2020).

Важным аспектом оценки генетической детерминации минерального обмена является анализ корреляционных взаимосвязей между содержанием химических элементов в органах и тканях, который выявил сложную систему межэлементных взаимодействий, характеризующуюся выраженной тканеспецифичностью (табл. 3).

Таблица 3 - Корреляции тяжелых металлов в пределах органов и тканей

Орган, ткань	Корреляция	$r_s \pm S_r$	P	Орган, ткань	Корреляция	$r_s \pm S_r$	P
Мышцы	Cd-Fe	$0,71 \pm 0,13$	<0,001	Легкие	Zn-Cu	$0,64 \pm 0,15$	<0,001
	Cd-Mn	$0,43 \pm 0,17$	<0,05		Zn-Mn	$0,59 \pm 0,16$	<0,01
	Pb-Zn	$0,568 \pm 0,24$	<0,05		Zn-Fe	$0,51 \pm 0,17$	<0,01
	Mn-Cu	$0,40 \pm 0,17$	<0,05		Cd-Zn	$0,53 \pm 0,17$	<0,01
	Fe-Mn	$0,61 \pm 0,15$	<0,05		Cd-Fe	$0,40 \pm 0,18$	<0,05
Селезенка	Cd-Cu	$0,67 \pm 0,15$	<0,001	Печень	Cd-Cu	$0,63 \pm 0,20$	<0,01
	Pb-Zn	$0,51 \pm 0,17$	<0,01		Pb-Zn	$0,46 \pm 0,17$	<0,05
Почки	Cd-Fe	$-0,50 \pm 0,16$	<0,05	Сердце	Cu-Zn	$0,60 \pm 0,15$	<0,001
	Cd-Zn	$-0,49 \pm 0,16$	<0,05		Fe-Mn	$0,53 \pm 0,17$	<0,01
	Pb-Cu	$0,62 \pm 0,18$	<0,01		Cd-Cu	$0,43 \pm 0,17$	<0,05
	Fe-Zn	$0,61 \pm 0,15$	<0,001	Волос	Cd-Fe	$0,44 \pm 0,18$	<0,05

Представленные корреляции отражают уникальные тканеспецифические паттерны взаимосвязей. В мышечной ткани, лёгких и сердце преобладают синергические связи (Cd–Fe, Zn–Cu, Fe–Mn), тогда как в почках наблюдается антагонизм Cd–Fe и Cd–Zn, указывающий на конкурентные механизмы канальцевой реабсорбции (Goyer, 1997; Yang, Shu, 2015). Не изменяются направление связи Fe–Mn в мышцах и миокарде, а также Cd–Cu в печени и селезёнке, что свидетельствует о стабильности данных взаимодействий в различных физиологических условиях. Для корреляций в пределах отдельных органов характерно низкое количество отрицательных связей, что указывает на преобладание процессов совместной аккумуляции металлов в тканях.

Для оценки интерьера с использованием неинвазивной диагностики критически важно понимание системных межорганных взаимосвязей (Мирошников и др., 2016; Калашников и др., 2017). В отличие от внутриорганных взаимодействий, где преобладает синергизм, межорганные корреляции характеризуются сбалансированным соотношением синергических и антагонистических связей (табл. 4).

Установлены устойчивые отрицательные ассоциации между уровнем цинка в волосе, сыворотке, лёгких и мышцах, с одной стороны, и содержанием кадмия в мышцах, почках и селезёнке — с другой, обусловленные конкуренцией Cd^{2+} и Zn^{2+} за металлотионеины (Brzóska, Moniuszko-Jakoniuk, 2001; Оберлис и др., 2008).

Таблица 4 – Значимые межорганные корреляции концентраций химических элементов у крупного рогатого скота

Пары элементов	Пары органов	$r \pm S_r$	p
Cd – Zn	Почки – Печень	0,767±0,070	<0,001
	Печень – Почки	0,720±0,120	<0,001
	Мышцы – Волос	-0,724±0,090	<0,001
	Селезенка – Печень	-0,721±0,090	<0,001
	Почки – Легкие	-0,697±0,100	<0,001
	Селезенка – Мышцы	-0,587±0,120	<0,001
Cd – Cu	Почки – Печень	0,855±0,050	<0,001
	Селезенка – Печень	-0,874±0,050	<0,001
	Печень – Легкие	-0,712±0,120	<0,001
	Мышцы – Печень	-0,557±0,130	<0,01
Cd – Fe	Мышцы – Печень	0,846±0,050	<0,001
	Сердце – Печень	0,553±0,130	<0,01
	Селезенка – Мышцы	-0,761±0,080	<0,001
	Селезенка – Печень	-0,674±0,100	<0,001
Cd – Pb	Почки – Печень	0,932±0,020	<0,001
	Селезенка – Мышцы	-0,772±0,110	<0,001
Cd – Cd	Печень – Мышцы	0,771±0,100	<0,001
	Печень – Почки	0,739±0,110	<0,001
	Селезенка – Мышцы	-0,909±0,030	<0,001
	Печень – Селезенка	-0,701±0,130	<0,001
Fe – Fe	Мышцы – Сердце	0,703±0,100	<0,001
	Мышцы – Легкие	0,628±0,110	<0,001
Cu – Mn	Мышцы – Печень	0,605±0,120	<0,001
	Почки – Печень	0,518±0,160	<0,01
	Печень – Сердце	-0,777±0,080	<0,001
	Печень – Легкие	-0,563±0,140	<0,01
	Печень – Мышцы	-0,555±0,130	<0,01

Наиболее выраженная положительная связь обнаружена между свинцом в печени и кадмием в почках ($r = 0,932$; $p < 0,01$), что подтверждает их совместную кумуляцию в паренхиматозных органах-мишенях (Goyer, 1997). Сильная отрицательная корреляция между кадмием в мышцах и селезёнке ($r = -0,909$) свидетельствует о барьерной функции селезёнки, ограничивающей проникновение Cd в периферические ткани. Установленная положительная связь между Cd и Cu в печени, сердце, лёгких и селезёнке обусловлена конкурентным связыванием на уровне транспортёра DMT1 и металлотионеинов (Brzóska, Moniuszko-Jakoniuk, 2001), что свидетельствует о плейотропном генетическом контроле минерального обмена и необходимости разработки комплексных селекционных индексов (Нарожных, 2019; Нохрин и др., 2024). Наибольшее количество корреляционных связей наблюдается для меди и железа (по 32,4 % от общего числа), что подчёркивает ключевую роль генов гем-содержащих белков и цитохромов в формировании минерального профиля организма. В волосе взаимосвязи железа с медью и кадмием имеют положительный характер, что подтверждает статус волосяного покрова как интегрального неинвазивного биомаркера (Завьялов, 2020; Мирошников и др., 2016).

Для оценки влияния элементного статуса на метаболический гомеостаз проведён анализ сопряжённости между концентрацией химических элементов в органах и биохимическими, ферментными и гематологическими показателями сыворотки крови (табл. 5).

Таблица 5 – Значимые корреляции ($r > 0,5$) содержания тяжелых металлов в органах с биохимическими и некоторыми гематологическими показателями крови

Орган, биосубстрат	Коррелирующие признаки	$r_s \pm S_r$	p
Печень	Cd – ЛКТ*	$0,704 \pm 0,130$	$< 0,01$
Волос	Cd – Щелочная фосфатаза	$0,646 \pm 0,114$	$< 0,001$
Волос	Cd – ЛДГ*	$-0,620 \pm 0,126$	$< 0,01$
Мышцы	Pb – АЛТ*	$-0,599 \pm 0,185$	$< 0,05$
Мышцы	Cd – Кислая фосфатаза общая	$-0,594 \pm 0,135$	$< 0,01$
Печень	Pb – Холестерин	$-0,589 \pm 0,131$	$< 0,01$
Почки	Cd – ЦП *	$0,563 \pm 0,125$	$< 0,01$
Печень	Zn – Холестерин	$-0,553 \pm 0,139$	$< 0,01$
Почки	Mn – Конъюгированный билирубин	$0,545 \pm 0,166$	$< 0,05$
Печень	Fe – Альбумин	$-0,521 \pm 0,146$	$< 0,01$

*ЛКТ- лизосомально-катионный тест, ЛДГ- лактатдегидрогеназа, АЛТ- аланинаминотрансфераза, ЦП – цветной показатель

Установлено, что накопление кадмия в волосе сопряжено с изменением активности щелочной фосфатазы ($r_s = 0,646$) и лактатдегидрогеназы ($r_s = -0,620$), что отражает сопряжённость элементного статуса с долгосрочными метаболическими сдвигами (Тарасова и др., 2019). Накопление свинца в мышцах и печени отрицательно ассоциировано с активностью АЛТ ($r_s = -0,599$) и холестерином ($r_s = -0,589$), указывая на угнетение синтетической функции печени. Положительная корреляция кадмия в почках с цветным показателем ($r_s = 0,563$) свидетельствует об активации белков острой фазы. Дополнительно выявлены связи элементов с глюкозой, альбумином, глобулинами и билирубином, отражающие генетическую координацию энергетического метаболизма и белкового синтеза (Anderson, 2004; Хиггинс, 2016; Sloup, 2017). Гематологический анализ подтвердил положительную корреляцию свинца в селезёнке с цветным показателем ($r = 0,417$; $p < 0,05$) и отрицательную связь железа селезёнки с конъюгированным билирубином ($r = -0,416$; $p < 0,05$), что отражает роль селезёнки в эритропоэзе.

Таким образом, выявленные корреляционные плеяды внутри органов, между органами и с биохимическими маркерами доказывают, что элементный статус представляет собой единую генетически детерминированную сеть взаимосвязей. Это обосновывает использование комплекса биохимических, ферментных и гематологических маркеров для неинвазивной скрининговой оценки животных и разработки селекционных индексов на устойчивость к аккумуляции экотоксикантов.

3.4. Генетико-селекционные факторы, определяющие аккумуляцию меди у сельскохозяйственных животных

3.4.1. Влияние генотипа быков-производителей на устойчивость и предрасположенность потомства к аккумуляции меди в мышечной ткани, печени и почках

Фундаментальной проблемой современной селекции является оценка генетической архитектуры сложных полигенных интерьерных признаков, к которым относится тканеспецифичная аккумуляция химических элементов. Определение роли наследственной обусловленности вариации минерального статуса является ключевым условием для разработки методов косвенной селекции и расчёта племенной ценности

(Петухов и др., 1989; 2007; Эрнст и др., 2008; Нарожных и др., 2019; Mateescu et al., 2013; Tizioto et al., 2015). В отличие от традиционной практики, где генотип голштинских быков-производителей оценивается преимущественно по молочной продуктивности дочерей (Горелик и др., 2025а) и показателям долголетия (Горелик и др., 2025б), наш подход расширяет спектр селекционных критериев за счёт включения интерьерных маркеров элементного гомеостаза. Это отвечает стратегическим задачам мобилизации собственного генофонда и повышения генетической устойчивости стад (Дунин и др., 2021а, 2021б; Дунин, 2025).

Для оценки влияния генотипа отцов на микроэлементный статус потомства проведён сравнительный анализ аккумуляции меди в мышечной ткани, печени и почках полусибсов голштинской породы (табл. 6).

Таблица 6 - Влияние генотипа отцов на концентрацию меди в органах и тканях, мг/кг

Кличка быка	n	Печень $\bar{x} \pm S\bar{x}$	Почки $\bar{x} \pm S\bar{x}$	Мышцы $\bar{x} \pm S\bar{x}$
Малстрем	8	49,4±12,6	4,33±0,122	0,582±0,108
Бонэир	6	38,5±8,1	4,01±0,254	0,740±0,062
Фабио	11	27,6±3,2	3,27±0,143	1,15±0,143
Брио	8	18,2±2,8	4,05±0,084	0,775±0,051

В мышечной ткани статистический анализ выявил достоверные межгрупповые различия: концентрация меди у потомков быка Фабио была в 2,0 раза выше, чем у сыновей Малстрема ($1,150 \pm 0,143$ против $0,582 \pm 0,108$ мг/кг; $p < 0,05$, тест Тьюки), что свидетельствует о генетической предрасположенности линии Фабио к усиленному депонированию меди в мускулатуре. Ранжированный ряд производителей имел вид: Малстрем (0,58) < Бонэир (0,74) ≈ Брио (0,78) < Фабио (1,15) в соотношении 1,0 : 1,3 : 1,3 : 2,0. По результатам однофакторного дисперсионного анализа сила влияния генотипа отцов на варьирование уровня меди в мышечной ткани составила $g_w = 0,25$ ($F = 3,74$; $p = 0,0215$), то есть четверть фенотипической изменчивости признака обусловлена наследственными факторами. Кластерный анализ (метод Уорда) подтвердил обособленное положение потомства Фабио с максимальной аккумуляцией меди (рис. 2).

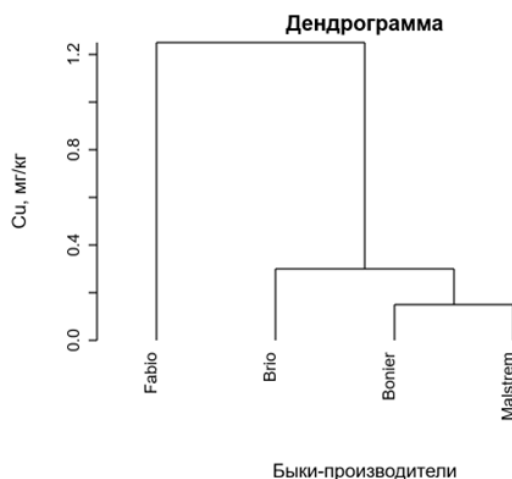


Рисунок 2 – Дендрограмма сходства концентрации меди в мышечной ткани сыновей некоторых быков-производителей

В печени картина распределения признака оказалась зеркальной: максимальная концентрация Cu зафиксирована у потомков Малстрема ($49,4 \pm 12,6$ мг/кг), минимальная — у сыновей Брио ($18,2 \pm 2,8$ мг/кг), различие в 2,7 раза достоверно ($p < 0,05$, тест Данна с коррекцией Холма). Ранжированный ряд производителей: Брио (18,2) < Фабио (27,6) < Бонэир (38,5) < Малстрем (49,4). По уровню депонирования меди в печени потомков быки разделились на два кластера: с высоким уровнем ($49,4$ – $38,5$ мг/кг — Малстрем, Бонэир) и

с низким (27,6–18,2 мг/кг — Фабио, Брио). Сила влияния генотипа отцов на содержание меди в печени составила $rw = 0,25$. В целом уровень меди в печени более чем в 30 раз превышал её содержание в мышечной ткани ($p < 0,001$).

Наиболее выраженное влияние отцовского генотипа установлено для почечной ткани: сила влияния генотипа быков-производителей на концентрацию меди в почках сыновей составила $rw = 0,48$ ($p < 0,01$), что вдвое превосходит аналогичный показатель для печени и мышечной ткани. Потомство Малстрема достоверно превосходило сыновей Фабио по уровню меди в почках в 1,3 раза ($4,33 \pm 0,122$ против $3,27 \pm 0,143$ мг/кг; $p < 0,01$, тест Данна с коррекцией Холма); потомки Брио и Бонэира также значимо превосходили потомков Фабио ($p < 0,05$). Ранжированный ряд имел вид: Фабио (3,27) < Бонэир (4,01) $\approx$ Брио (4,05) < Малстрем (4,33) в соотношении 1,00 : 1,23 : 1,24 : 1,32. Внутригрупповая изменчивость признака оказалась невысокой ($Cv = 6,5\text{--}15,4\%$), что указывает на жёсткий гомеостатический контроль уровня меди в почечной ткани. Кластерный анализ дифференцировал производителей на группы с высоким (Малстрем) и средним (Бонэир, Брио) уровнями аккумуляции, а также обособленную группу с минимальными значениями (Фабио).

Зеркальный характер ранжирования производителей по мышечной ткани и печени и различная структура кластеров по органам указывают на тканеспецифичность генетического контроля: механизмы депонирования меди в скелетной мускулатуре, печени и почках регулируются частично независимыми генетическими системами, вероятно, связанными с дифференциальной экспрессией транспортных белков (АТР7А, АТР7В) и металлотионеинов. Полученные данные подтверждают наследственную детерминацию микроэлементного статуса и обосновывают возможность использования уровня аккумуляции меди в качестве селекционируемого признака при оценке быков-производителей по качеству потомства.

При этом статистически значимого влияния генотипа отцов, например, на содержание марганца в мышечной ткани потомков выявлено не было, что подчёркивает элемент-специфичность наследственного контроля. Поскольку в зоне районирования скота содержание тяжёлых металлов в почве, воде и кормах не превышало ПДК, выявленную межгрупповую изменчивость следует отнести преимущественно к генетической компоненте. Практическая ценность результатов заключается во включении оценки элементного статуса в комплексную характеристику быков-производителей и целенаправленном отборе по микроэлементному статусу для производства экологически безопасной продукции в различных почвенно-климатических зонах.

3.4.2. Влияние породной принадлежности на уровень меди в мышечной ткани животных

Другим подходом к выяснению наследственной обусловленности уровня тяжёлых металлов является изучение межпородной дифференциации по концентрации микроэлементов. Изучение подобных различий имеет важнейшее значение, поскольку сохранение генетического разнообразия крупного рогатого скота является основой успешного развития животноводства и селекционной работы (Кочнева и др., 2016; Амерханов и др., 2023; Korotkevich et al., 2014). Совместно с К.Н. Нарожных и др. (Нарожных и др., 2014; Narozhnykh et al., 2016) изучалось содержание тяжёлых металлов в организме животных голштинской, черно-пёстрой и герефордской пород. Биогеохимический мониторинг подтвердил отсутствие токсической нагрузки (концентрации ниже ПДК), что позволяет трактовать выявленную фенотипическую вариабельность как проявление аддитивной генетической дисперсии, обусловленной породной принадлежностью.

Таблица 7 - Содержание меди в мышечной ткани пород крупного рогатого скота, мг/кг

Порода	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	IQR
Черно-пестрая	34	$1,76 \pm 0,09$	1,50	0,30

Голштинская	34	0,97±0,09	0,84	0,35
Герефордская	28	1,03±0,03	1,02	0,23

Установлено, что содержание меди в мышечной ткани животных статистически значимо варьирует в зависимости от породы. Наиболее высокая концентрация Cu обнаружена в мышечной ткани скота черно-пёстрой породы, где она на 80 % превышает уровень голштинской породы ($P < 0,001$) и на 70 % — герефордской ($P < 0,001$). Ранжирование пород по уровню меди в мышцах демонстрирует следующую закономерность: голштинская $\approx$ герефордская $<$ черно-пёстрая (соотношение 1,0 : 1,1 : 1,8). Оценка индивидуальной вариабельности уровня меди в мышцах выявила наибольший размах у голштинской породы (отношение крайних вариантов 1 : 21), что свидетельствует о высоком генетическом разнообразии данной популяции.

Ключевым селекционно-генетическим результатом является то, что показатель силы влияния (r_w) генофонда трёх пород Западной Сибири на содержание меди в мышечной ткани составил 0,64 ($P < 0,001$). Это свидетельствует о значительной доле влияния генетических факторов на уровень меди в мышцах. Полученные данные согласуются с результатами Tizito et al. (2015), установивших коэффициент наследуемости (h^2) уровня меди в мышечной ткани у скота породы Nelore на уровне 0,30, а также с данными Mateescu et al. (2013) для ангусской породы (h^2 железа — $0,544 \pm 0,09$). Сравнительный анализ литературных данных свидетельствует о существенной межпородной дифференциации по элементному статусу: у датских голштинов наибольшие значения h^2 установлены для кальция (0,72) и цинка (0,49) в молоке, тогда как у датских джерси — для кальция (0,63) и цинка (0,57) (Buitenhuis et al., 2015); у свиней наследуемость минеральных параметров крови варьировала от 0,27 до 0,54 (Reyer et al., 2019).

Таким образом, совокупность литературных данных и результатов настоящего исследования демонстрирует, что концентрации микроэлементов в тканях сельскохозяйственных животных являются умеренно наследуемыми признаками ($h^2 = 0,27\text{--}0,72$), существенно варьирующимися в зависимости от вида, породы и типа ткани. Высокая доля фактора «порода» в вариации содержания меди ($r_w = 0,64$), установленная в настоящем исследовании, согласуется с литературными данными и подтверждает возможность селекции на оптимизацию элементного статуса с учётом породной принадлежности. При этом форсированный отбор по продуктивным признакам сопряжён с изменением структуры аллелофонда (Модоров и др., 2021), что может косвенно влиять на метаболизм микроэлементов, обосновывая необходимость включения интерьерных признаков в комплексные селекционные программы.

3.5. Связь частоты соматической хромосомной нестабильности с уровнем тяжелых металлов в органах и тканях быков черно пестрой породы

Кариотипический статус является важнейшим интерьерным показателем, отражающим генетическое здоровье популяции и её устойчивость к факторам среды (Зиновьева и др., 2019; Кочнева, 2017; Куликова, 1998). У быков черно-пёстрой породы в возрасте 13–14 месяцев изучена частота соматической хромосомной нестабильности (СХН). В условиях отсутствия токсического пресса (концентрации элементов ниже ПДК) выявленный уровень СХН отражает базовую генетическую стабильность генофонда (Петухов и др., 2001; Сысо и др., 2017a; Petukhov et al., 2016a; Narozhnykh et al., 2016, 2017b).

Межпородные различия подтверждают зависимость СХН от генетической конституции: у черно-пёстрой породы частота полиплоидии составила 2,65–9,7 %, тогда как у интродуцированного серого украинского скота — до 17,0 % (Кочнева, 2005; Куликова, 1998; Камалдинов и др., 2010). Снижение аллельного разнообразия в современных популяциях по сравнению с историческими образцами коррелирует с ростом хромосомной нестабильности (Абдельманова и др., 2020). Сравнительный анализ Wojcik

et al. (2019) показал более высокую геномную стабильность аборигенных пород ($3,89 \pm 0,51$ обменов на клетку) по сравнению с интенсивно селекционируемыми линиями ($6,03 \pm 0,63$).

В ходе исследований была изучена связь кариотипического статуса с накоплением элементов (табл. 8).

Таблица 8 - Корреляции содержания тяжелых металлов в органах и тканях с показателями соматической хромосомной нестабильности

Орган, ткань	n	Коррелирующие признаки	$r_s \pm S_r$	p
Печень	24	Cd - полиплоидия, %	$0,473 \pm 0,19$	$<0,020$
	24	Cu - полиплоидия, %	$0,540 \pm 0,18$	$<0,006$
	24	Cu - гипоплоидия, %	$0,362 \pm 0,17$	$<0,05$
Мышечная ткань	24	Cu - полиплоидия, %	$0,384 \pm 0,17$	$<0,05$
Сердце	25	Fe - гиперплоидия, %	$0,410 \pm 0,17$	$<0,05$
Селезенка	25	Cd - полиплоидия, %	$0,511 \pm 0,15$	$<0,001$
	25	Cu - гиперплоидия, %	$0,562 \pm 0,14$	$<0,001$
	25	Mn - гиперплоидия, %	$0,534 \pm 0,14$	$<0,001$
Волос	25	Fe - триплоидия, %	$-0,398 \pm 0,17$	$<0,05$
Легкие	25	Fe - диплоидность	$0,387 \pm 0,17$	$<0,05$

Аккумуляция тяжелых металлов способна вызывать глубокие интеръерные сдвиги, затрагивая фундаментальные процессы поддержания стабильности генома. Хромосомные aberrации в соматических клетках выступают объективным биомаркером такого мутагенного влияния (Куликова, 1998, 2015; Кочнева, 2005, 2017).

В ходе исследований выявлено, что накопление токсичных элементов (Cd) и избыток меди (Cu) ассоциированы с ростом частоты числовых хромосомных мутаций. В частности, увеличение уровня Cd и Cu в печени связано с более высокой частотой полиплоидии и гипоплоидии. В селезенке содержание кадмия, так же как и в печени, приводит к повышению частоты полиплоидии. Содержание меди в мышечной ткани и селезенке положительно коррелирует соответственно с полиплоидией и гиперплоидией.

Противоположная закономерность обнаружена для железа: повышение концентрации Fe в волосе ведет к уменьшению частоты триплоидии. Однако увеличение концентрации Fe в сердце и легких вызывает рост гиперплоидии и диплоидности соответственно, что свидетельствует о стабилизирующей роли железа в поддержании нормального кариотипа.

Из всех исследованных металлов уровни Cd и Cu в органах и тканях в наибольшей степени связаны с повышением частоты хромосомных мутаций. Это свидетельствует о выраженном генотоксическом эффекте данных элементов и обосновывает возможность использования показателей хромосомной нестабильности в качестве критериев оценки генетического здоровья животных и биомаркеров загрязненности окружающей среды.

3.6. Биотехнологические подходы к прижизненной диагностики тяжелых металлов в органах и тканях крупного рогатого скота

Разработка биотехнологических методов прижизненной оценки элементного статуса органов и тканей имеет фундаментальное значение для современной селекции, так как позволяет проводить массовый скрининг племенного поголовья без применения методов, требующих забоя животных (Нарожных и др., 2015; Tsygankova et al., 2017; Konovalova et al., 2017b; Фролов и др., 2025б). Волосяной покров крупного рогатого скота является стабильным интеръерным маркером, ретроспективно отражающим генетически детерминированные особенности минерального обмена. В условиях стандартизированного содержания в Западной Сибири была изучена связь элементного состава волоса и сыворотки крови с уровнем химических элементов в паренхиматозных органах.

Установлено, что между содержанием меди и калия в волосе и уровнем свинца в печени и селезенке существует достоверная корреляционная связь (патент № 2421726). Наиболее информативным критерием для косвенной оценки концентрации Pb в печени оказалось содержание калия в волосе ($r = 0,81 \pm 0,06$; $p = 0,01$). Маркером уровня свинца в лёгких стала концентрация марганца в волосе (патент № 2602915): между этими элементами обнаружена положительная корреляция ($r = 0,62 \pm 0,15$; $p = 0,01$). Для определения содержания кадмия в

мышечной ткани в качестве предиктора использован уровень цинка в сыворотке крови (патент № 2426119), между которыми установлена средняя отрицательная корреляция ($r = -0,468 \pm 0,167$; $p = 0,05$).

Таблица 9 - Способы прижизненного определения уровня поллютантов в органах и тканях

№ Патента	Пара элементов	$r_s \pm S_r$	R^2	p	Уравнение прямой регрессии
2421726	Cu волос - Pb селезенка	$0,52 \pm 0,14$	0,24	0,01	$y = 0,0122x - 0,0571$
2602915	Mn волос - Pb легкие	$0,62 \pm 0,15$	0,38	0,01	$y = 0,0179x - 0,0067$
2426119	Zn сыворотка крови - Cd мышцы	$-0,468 \pm 0,167$	0,22	0,05	$y = -0,0000118x + 0,0233$

Примечание: R^2 – коэффициент детерминации.

Анализ параметров моделей показал, что наибольшую прогностическую точность демонстрирует модель для определения свинца в лёгких по содержанию марганца в волосе: скорректированный коэффициент детерминации составил 0,38 при ошибке прогноза 0,012 мг/кг. Результаты кросс-валидации методом «скользящего контроля» (leave-one-out) подтвердили устойчивость разработанных уравнений: расхождение между исходными и прогнозными значениями не превышало 15–20 % в пределах изученного диапазона концентраций.

Разработанные биотехнологические подходы универсальны и применяются для оценки интерьерных признаков у других видов сельскохозяйственных животных. По содержанию марганца и меди в чешуе определяют уровень меди в мышечной ткани рыбы (патент № 2555518), по уровням Pb, Cd, Cu, Fe и Zn в щетине — свинца в печени свиней (патент № 2285920), концентрацию Mn в копытном роге используют для определения Cd в мышечной ткани, сердце и печени (патент № 2342659). Комплексные исследования на свиньях породы СМ-1 продемонстрировали, что аккумуляция химических элементов в производных кожи тесно связана с гематологическим и биохимическим статусом, что подтверждает высокую информативность этих биосубстратов для комплексной оценки генетической ценности и интерьерного статуса животных (Зайко и др., 2017; патент № 2377772).

Таким образом, валидация регрессионных моделей подтвердила их пригодность для скрининговой оценки накопления тяжелых металлов в органах-депо. Разработанный малоинвазивный диагностический инструментарий существенно расширяет возможности ветеринарного и экологического контроля, а также селекции животных на устойчивость к содержанию поллютантов в органах и тканях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены референсные значения и закономерности тканеспецифичного распределения эссенциальных (Fe, Cu, Zn, Mn) и токсичных (Pb, Cd) элементов в семи органах и тканях крупного рогатого скота черно-пестрой породы, отражающие функциональную специализацию органов-депо и служащие объективными индикаторами фенофона породы в биогеохимических условиях Западной Сибири. Установлено, что при фоновом (не превышающем ПДК) содержании токсикантов в объектах окружающей среды Западной Сибири, максимальное депонирование меди происходит в печени (8,99 мг/кг), цинка – в волосе (96,41 мг/кг), железа – в селезенке (495,79 мг/кг), а марганца – в почках (0,99 мг/кг). Отмечена высокая фенотипическая изменчивость уровней кадмия и свинца.

2. Выявлены устойчивые внутриорганные и межорганные корреляционные плеяды тяжёлых металлов, а также их ассоциации с биохимическими маркерами сыворотки крови (активность щелочной фосфатазы, ЛДГ, глюкоза, цветной показатель), отражающие системные метаболические сдвиги и формирующие базу для косвенной прижизненной оценки элементного гомеостаза. При гематологическом исследовании установлено, что содержание эритроцитов у бычков черно-пестрой породы составило $6,97 \pm 0,18 \times 10^{12}/л$,

лейкоцитов – $7,67 \pm 0,60 \times 10^9/\text{л}$, гемоглобина – $130,30 \pm 3,34 \text{ г/л}$, СОЭ – $0,66 \pm 0,07 \text{ мм/ч}$, цветной показатель – $1,240 \pm 0,047$. Показатели находились в пределах физиологической нормы, за исключением незначительного превышения референсных значений гемоглобина и цветного показателя, что свидетельствует об удовлетворительном физиологическом статусе и высокой адаптивной пластичности животных. Установлена положительная корреляция между концентрацией свинца в селезенке и цветным показателем крови ($r = 0,417$; $p < 0,05$), что может отражать участие данного органа в процессах эритропоза и метаболизма гемоглобина. Выявлены значимые фенотипические корреляции, определяющие закономерности внутриорганного и межорганного распределения металлов и их связь с метаболизмом. Установлены высокие положительные сопряженности между уровнем Cd в почках и Pb в печени ($r_s = 0,932$), а также между содержанием кадмия в печени и ЛКТ в сыворотке крови ($r_s = 0,704$; $p < 0,01$), а также Zn в волосе и Cd в мышечной ткани ($r_s = -0,724$; $p < 0,01$). Обнаружена положительная корреляция между уровнем кадмия в волосах и активностью щелочной фосфатазы ($r_s = 0,646$; $p < 0,001$) и отрицательная – с лактатдегидрогеназой ($r_s = -0,620$; $p < 0,001$). Величина и направление корреляций указывают на возможность использования биохимических параметров в качестве индикаторов для косвенной оценки микроэлементного статуса.

3. Доказана наследственная обусловленность микроэлементного статуса потомства, проявляющаяся в достоверном влиянии генотипа быков-производителей на уровень депонирования меди в печени, почках и мышечной ткани ($r_w = 0,25-0,48$; $p < 0,05$), что обосновывает возможность селекции на оптимизацию минерального гомеостаза.

4. Установлены достоверные межпородные различия по концентрации меди в мышечной ткани (черно-пестрая — $1,76 \text{ мг/кг}$; голштинская — $0,97 \text{ мг/кг}$; герефордская — $1,03 \text{ мг/кг}$; $r_w = 0,64$; $p < 0,001$), подтверждающие высокую долю генетической детерминации данного интерьерного признака и необходимость учёта породной принадлежности при разработке селекционных программ.

5. Доказано генотоксическое действие поллютантов, подтверждённое прямой ассоциацией между накоплением кадмия и меди в паренхиматозных органах и ростом частоты соматической хромосомной нестабильности ($r = 0,362 - 0,562$ — полиплоидии, гипоплоидии, гиперплоидии), что обосновывает возможность использования цитогенетического скрининга в комплексе с элементным профилем для мониторинга генетического здоровья популяций.

6. Впервые для крупного рогатого скота разработан и запатентован комплекс неинвазивных методов прижизненной оценки степени аккумуляции тяжёлых металлов (свинца и кадмия) в органах-депо по элементному составу волоса и сыворотки крови (патенты № 2421726, № 2602915, № 2426119), выступающих в качестве скринингового инструмента для селекционно-племенной работы в оценке генотипа производителей по устойчивости потомства к содержанию тяжёлых металлов и получения экологически чистой продукции.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Установленные средние и референсные значения содержания меди, кадмия, свинца, цинка, железа и марганца в органах и тканях крупного рогатого скота черно-пестрой породы, выращенного в условиях Западной Сибири, могут использоваться для оценки фенофона породы, в качестве диагностических ориентиров при ветеринарно-санитарной экспертизе и экологической оценке мясной продукции.

2. Разработанные неинвазивные методы прижизненной оценки содержания тяжелых металлов в органах (по элементному составу волоса и биомаркерам в сыворотке крови) могут быть рекомендованы для мониторинга элементного состояния животных (патенты № 2421726, № 2602915, № 2426119) и использования методов селекции для регулирования их уровня в органах и тканях.

3. Полученные результаты и предложенные методы могут быть внедрены в практику разведения крупного рогатого скота, ветеринарной токсикологии, зоогигиены и биогеохимического мониторинга, а также при разработке систем экологического сопровождения животноводства и контроля безопасности продуктов питания. При повышенном уровне тяжелых металлов в органах рекомендуется проводить цитогенетический скрининг стад для оценки генетического здоровья популяции. Увеличение частоты полиплоидии и гипоплоидии может служить биомаркером токсической нагрузки.

4. Для прижизненной оценки содержания тяжелых металлов в органах рекомендуется использовать биохимические маркеры: активность щелочной фосфатазы (связь с Cd в волосе, $r=0,646$), ЛДГ (отрицательная связь с Cd, $r=-0,620$), АЛТ (отрицательная связь с Pb в мышцах, $r=-0,599$).

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Проведённое исследование формирует надёжный научно-технологический задел и открывает широкие перспективы для дальнейших изысканий в области генетики, селекции и экотоксикологии сельскохозяйственных животных.

1. Масштабирование оценки влияния генотипа отцов-производителей на аккумуляцию тяжёлых металлов у потомства с вовлечением в анализ других отечественных и зарубежных пород крупного рогатого скота, а также других видов продуктивных животных. Это позволит выявить как специфические, так и универсальные эволюционно-генетические закономерности элементного обмена.

2. Дальнейший поиск, валидация неинвазивных и малоинвазивных биомаркеров для прижизненного определения концентрации тяжёлых металлов в органах-депо животных. Планируется разработка аналогичных математических моделей для других видов животных с учётом специфики различных биогеохимических провинций.

3. Поиск ассоциаций полиморфизма генов-кандидатов (металлотионеины, транспортеры Fe, Cu, Zn) с межпородными различиями в элементном статусе рамках кандидатно-генного подхода. Применение технологий полногеномного ассоциативного поиска (GWAS) на основе BovineSNP50/HD с последующей разработкой эффективных ДНК-тест-систем для раннего отбора животных, генетически устойчивых к накоплению поллютантов, с целью получения экологически безопасной продукции.

4. Изучение перспектив интеграции интерьерных маркеров минерального обмена в селекционные программы крупного рогатого скота с целью прогнозирования племенной ценности быков-производителей по устойчивости потомства к аккумуляции экотоксикантов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Работы, опубликованные в журналах из перечня ВАК и приравненных к ним

1. **Коновалова Т.В.** Влияние генотипа отцов на содержание меди в печени потомков у крупного рогатого скота / **Т.В. Коновалова** // Вестник НГАУ. – 2024. – №1 (70). – С.196 - 203. DOI: 10.31677 / 2072-6724-2024-70-1-196-203.
2. **Коновалова Т.В.** Характеристика интерьера и экологическое нормирование содержания тяжелых металлов в почках черно-пестрого скота / **Т.В. Коновалова** // Главный зоотехник. – 2016. – №7. – С. 48-53.
3. Стрижкова М.В. Содержание макроэлементов в сыворотке крови животных черно-пестрой породы / М.В. Стрижкова, **Т.В. Коновалова**, О.С. Короткевич // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2017. – № 4 (45). – С.75-82.
4. Accumulation of Cu and Zn in the soils, rough fodder, organs and muscle tissues of cattle in Western Siberia / V. L. Petukhov, A.I. Syso, K.N. Narozhnykh, **T.V. Konovalova** [et al.] //

- Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Т. 7 – № 4. – P. 2458-2464.
5. Narozhykh K.N. Iron content in soil, water, fodder, grain, organs and muscular tissues in cattle of Western Siberia (Russia) / K.N. Narozhnykh, **T.V. Konovalova**, J.I. Fedyaev [et al.] // Indian Journal of Ecology. – 2017. – Т.44. – №2. – P.217-220.
6. Syso, A.I. Ecological and biogeochemical evaluation of elements content in soils and fodder grasses of the agricultural lands of Siberia / A.I. Syso, M.A. Lebedeva, A.S. Cherevko, **T.V. Konovalova** [et al.] // Journal of Pharmac. Sci. and Research. – 2017. – Vol. 9. – Issue 4. – P. 368–374.
7. Стрижкова М.В. Содержание свинца в органах и тканях бычков черно-пестрой породы / М.В. Стрижкова, Т.В. Петухова (**Т.В. Коновалова**), О.С. Короткевич // Главный зоотехник. – 2011. – №6 – С. 66-68.
8. Petukhova T.V. (**Konovalova T.V.**) Content of heavy metals in the muscle tissue of cattle. Proceeding of the 16th International conference on Heavy Metals in the Environment ICHMET 2013. E3S Web of Conference Vol. 1 (2013) Rome, Italy 23-27 September 2013. electronic edition Издательство: EDP Science. P. 409 - 411. – DOI: 10.1051/e3sconf/20130115002.
9. **Konovalova T.V.** Copper content in hair, bristle and feather in different species reared in Western Siberia / **T.V. Konovalova**, K.N. Narozhnykh [et al.] // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2017 – Vol. 44. – №S. – P.74.

Патенты

10. Патент RU 2602915 C1, 27.10.2016. "Способ определения концентрации свинца в легких крупного рогатого скота" / **Т.В. Коновалова**, О.С. Короткевич, К.Н. Нарожных [и др.]. Заявка №2015130994 / 15 от 24.07.2015.
11. Патент RU 2421726 C1, 20.06.2011. "Способ определения содержания свинца в органах крупного рогатого скота" / О.С. Короткевич, В.Л. Петухов, М.В. Стрижкова, **Т.В. Коновалова (Т.В. Петухова)** [и др.]. Заявка №2010113845 / 5 от 08.04.2010.
12. Патент RU 2426119 C1, 10.08.2011. "Способ определения содержания кадмия в мышечной ткани крупного рогатого скота" / О.С. Короткевич, В.Л. Петухов, М.В. Стрижкова, **Т.В. Коновалова (Т.В. Петухова)** [и др.]. Заявка №2010111307 / 15 от 24.03.2010.

Работы, опубликованные в других изданиях

13. Короткевич О.С. Биохимия мяса (учебник) / О.С. Короткевич, О.И. Себежко, **Т.В. Коновалова**, Н.М. Костомахин. – Санкт-Петербург: Лань, 2026. – 336 с.
14. Нарожных К.Н. Межвидовые различия по концентрации тяжелых металлов в производных кожи животных / К.Н. Нарожных, **Т.В. Коновалова**, И.С. Миллер [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2015. – №2 – 26. – С.5815 - 5819.
15. **Коновалова Т.В.** Изменчивость и сопряженность аккумуляции некоторых тяжелых металлов в легочной ткани животных черно-пестрой породы / Т.В. Коновалова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №3. – С.618.
16. Нарожных К.Н. Межпородные различия по уровню макро- и микроэлементов в мышечной ткани крупного рогатого скота Западной Сибири / К.Н. Нарожных, М.В. Стрижкова, **Т.В. Коновалова** // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-10. – С. 2158-2163.
17. **Коновалова Т.В.** Содержание марганца в скелетной мускулатуре сыновей некоторых быков голштинской породы / **Т.В. Коновалова** // В сборнике: Теория и практика современной аграрной науки. Сборник VI национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием. – Новосибирск. – 2023. – С. 730-732.
18. **Коновалова Т.В.** Связь кадмия в печени с биохимическими показателями крови / **Т.В. Коновалова** // Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа. – 2020. – С. 5-9.

19. **Коновалова Т.В.** Аккумуляция кадмия в почках у бычков голштинской породы / **Т.В. Коновалова**, Ю.И. Федяев // Роль аграрной науки в условиях развития сельских территорий. Сборник IV Всероссийской (национальной) конференции. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос». – 2019. – С.112-114.
20. **Коновалова Т.В.** Влияние генотипа быков-производителей голштинской породы на аккумуляцию железа в волосе потомков. / **Т.В. Коновалова**, Ю.И. Федяев // Теория и практика современной аграрной науки. Сборник II Национальной (всероссийской) конференции. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2019. – С. 295-297.
21. **Коновалова Т.В.** Связь частоты полиплоидии с уровнем некоторых тяжелых металлов в органах скота черно-пестрой породы / **Т.В. Коновалова** // Кормопроизводство, продуктивность, долголетие и благополучие животных. Материалы международной научно-практической конференции. –Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос». – 2018. – С. 28-30.
22. Федяев Ю.И. Содержание и изменчивость меди в печени быков голштинской породы Сибири /Ю.И. Федяев, **Т.В. Коновалова** [и др.] // Кормопроизводство, продуктивность, долголетие и благополучие животных. Материалы международной научно-практической конференции. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос». – 2018. – С. 112–114.
23. **Коновалова Т.В.** Аккумуляция экотоксикантов в паренхиматозных органах быков черно-пестрой породы Западной Сибири / **Т.В. Коновалова** // Аграрная наука - сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии. Сборник научных докладов XX Международной научно-практической конференции. — Краснообск: СФНЦ агробиотехнологии РАН. – 2017. – Ч.1. – С. 376-379.
24. Себежко О.И. Оценка фенотипической изменчивости некоторых ферментов переаминирования у крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири / Себежко О.И., **Коновалова Т.В.**, Язиков И.К. и др. // Теория и практика современной аграрной науки. Сборник VI национальной конференции. – Новосибирск, 2023. – С. 762-764.
25. **Konvalova T.V.** Interspecies differences in Zn content in liver of animals of the Siberian region / **T.V. Konvalova**, K.N. Narozhnykh, Y.I. Fedyaev [et al.] // 33. Joint Annual Meeting of the German Society for Minerals and Trace Elements (GMS) with Zinc-UK and Zinc-Net COST Training School Zinc and another Transition Metals in Health and Disease. Editor Lothar Rink, Inga WeBels, Martina Maywald. 2017. – P.40.
26. **Konvalova T.V.** Content of heavy metals in the muscle tissue of cattle / **T.V. Konvalova** // Progress Throught Innovation. Тезисы городской научно-практической конференции аспирантов и магистрантов. Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2014. – С.111.
27. **Konvalova T.V.** The concentration of heavy metals in the liver of West Siberian cattle / **T.V. Konvalova** // 17th International Conference of Heavy Metals in the Environment. Proceeding of Abstract. – Guiyang, China: Изд. University of Guiang. – 2014 – P. 75.
28. Narozhnykh K.N. Cadmium accumulation on soil, fodder, grain, organs and muscular tissue of cattle of West Siberia / K.N. Narozhnykh, **T.V. Konvalova**, J.I. Fedyaev, [et al.] // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. 2016 . – Т. 7. № 4. – P. 1758 - 1764.
29. Narozhnykh K.N. Cadmium content variability in organs of West Siberian Hereford bull-calves / V. L. Petukhov, K.N. Narozhnykh, **T.V. Konvalova** [et al.] // 17th International Conference of Heavy Metals in the Environment. Proceeding of Abstract. – Guiyang, China: Изд. University of Guiang. – 2014 – P. 74.

Подписано в печать ____ июля 2026 г.
Формат 60 х 84 1/16.
Объем 1,0 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз., заказ № _____
Отпечатано в Издательском центре НГАУ «Золотой колос»
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.
Тел. (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru