

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский государственный университет инженерии
и биотехнологий»

На правах рукописи

КОНОВАЛОВА ТАТЬЯНА ВАЛЕРЬЕВНА

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

4.2.5 – Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель:

д.вет. наук, профессор, академик РАН Александр Семенович Донченко

д.с.-х. наук, профессор,
академик НАН Беларуси,
Шейко Иван Павлович

Новосибирск 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	16
1.1. Тяжёлые металлы и эссенциальные элементы как интерьерные признаки и биологические маркеры в селекции сельскохозяйственных животных.....	16
1.2. Генетические аспекты накопления химических элементов в организме животных.....	29
1.3. Межпородные и внутripородные различия по микроэлементному статусу как проявление генетического разнообразия и влияние генотипа производителей на минеральный обмен у потомства.....	33
1.4. Методы оценки интерьерных признаков в селекции: связь элементного гомеостаза с продуктивностью, адаптивностью и неинвазивная диагностика.....	38
1.5. Биогеохимические провинции и их влияние на фенотипическую изменчивость интерьерных признаков.....	41
1.6. Цитогенетические маркеры генетического здоровья животных.....	44
1.7. Современные методы геномной селекции и неинвазивной диагностики по интерьерным признакам.....	47
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	52
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	60
3.1. Биогеохимическая характеристика территории разведения как основа для оценки генетической детерминации элементного статуса животных.....	60
3.2. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в органах и тканях крупного рогатого скота как комплекса интерьерных признаков.....	64
3.2.1. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в мышечной ткани как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков	64
3.2.2. 3.2.1. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в миокарде как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков	70

3.2.3. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в печени как критерий генетической variability интерьерных признаков	74
3.2.4. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в почках как критерий генетической variability интерьерных признаков	77
3.2.5. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в легких как критерий генетической variability интерьерных признаков.....	81
3.2.6. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в селезенке как критерий генетической variability интерьерных признаков.....	83
3.2.7. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в волосе как критерий генетической variability интерьерных признаков	86
3.3. Гематологические и биохимические показатели как основа оценки реализации генетического потенциала и адаптивной пластичности быков черно-пестрой породы	89
3.3.1. Гематологические и биохимические показатели крови.....	89
3.3.2. Ферменты крови как интерьерные маркеры интенсивности метаболизма и породной специфики.....	94
3.3.3. Взаимосвязь биохимических показателей крови с уровнем накопления элементов в органах.....	97
3.3.4. Корреляция тяжелых металлов внутри органов и тканей как проявление плеiotропного генетического контроля минерального обмена.....	103
3.3.5. Корреляция тяжелых металлов между органами и тканями.....	107
3.4. Генетико-селекционные факторы, определяющие аккумуляцию меди у сельскохозяйственных животных.....	113

3.4.1. Влияние генотипа быков-производителей на устойчивость и предрасположенность потомства к аккумуляции меди в мышечной ткани, печени и почках.....	113
3.4.2. Влияние породной принадлежности на уровень меди в мышечной ткани животных.....	123
3.5. Связь частоты соматической хромосомной нестабильности с уровнем тяжелых металлов в органах и тканях быков черно-пестрой породы.....	132
3.6. Биотехнологические подходы прижизненной диагностики тяжелых металлов в органах и тканях крупного рогатого скота.....	136
Обсуждение	140
Заключение.....	149
Предложение	151
Перспективы дальнейшей разработки темы.....	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность 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. Требуются исследования 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 научного 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.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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 фенофона 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.

Теоретическое и практическое значение 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.

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.

Благодарность. Автор выражает глубочайшую признательность и искреннюю благодарность своим научным руководителям: доктору ветеринарных наук, профессору, академику РАН Александру Семеновичу Донченко и доктору сельскохозяйственных наук, профессору, академику НАН Беларуси Ивану Павловичу Шейко. Их неоценимая научная поддержка, мудрое руководство, высокий профессионализм и постоянное внимание к деталям исследования на всех этапах выполнения настоящей работы стали залогом ее успешного завершения.

Особая благодарность выражается руководству и коллективу ФГБОУ ВО «Университет биотехнологий» и лично коллегам по кафедре ветеринарной генетики и биотехнологии. Автор признателен ректору университета Евгению Владимировичу Рудому за создание благоприятных условий для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований, предоставление современной материально-технической базы и всестороннюю поддержку научных инициатив.

Искреннюю благодарность автор выражает своим коллегам и соавторам научных публикаций – О.И. Себежко, К.Н. Нарожных и О.С. Короткевич. Спасибо вам за многолетнее плодотворное сотрудничество, неоценимую помощь в организации экспедиционных выездов для сбора биологического материала, активное участие в проведении лабораторных анализов и конструктивные научные дискуссии при интерпретации полученных данных.

Также автор признателен сотрудникам сертифицированных аналитических центров и лабораторий Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН и Института почвоведения и агрохимии СО РАН за возможность проведения спектральных, биохимических и агрохимических исследований, а также всем, кто своим советом, помощью и моральной поддержкой способствовал завершению данной работы.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Тяжёлые металлы и эссенциальные элементы как интерьерные признаки и биологические маркеры в селекции сельскохозяйственных животных

Эффективность селекционно-племенной работы в животноводстве напрямую зависит от глубины понимания биологических механизмов, лежащих в основе продуктивности и адаптивности поголовья. Традиционная оценка, опирающаяся преимущественно на экстерьерные и зоотехнические показатели, в современных условиях дополняется тщательным анализом интерьерных признаков (Шейко, 2021; Зиновьева и др., 2019). К данной категории относят комплекс биохимических, гематологических, цитогенетических и молекулярно-генетических характеристик, которые объектно отражают степень реализации генетического потенциала и резистентность организма к факторам среды (Петухов и др., 1989; Красота и др., 2006; Ерохин и др., 2004; Hejna et al., 2018; Костомахин и др., 2023; Кочнева, 2016). Особый интерес в этом контексте представляет элементный статус животных. Тяжёлые металлы, представленные как эссенциальными нутриентами (Fe, Cu, Zn, Mn), так и токсикантами (Pb, Cd), всё чаще рассматриваются исследователями не просто как объекты ветеринарно-токсикологического контроля, но и как значимые интерьерные биомаркеры, отражающие интенсивность метаболизма и генетическую пластичность особи (Мирошников и др., 2016; Завьялов, 2020; Фролов, 2021; Абилов и др., 2021, 2023).

Концентрация и взаимное соотношение химических элементов в биосубстратах служат интегральным индикатором функционального состояния органов и систем, а также генетически детерминированных особенностей метаболизма (Скальный, Рудаков, 2005; Дускаев и др., 2014; Донник и др., 2015). Эволюционно сформированные механизмы гомеостаза микроэлементов находятся под строгим генетическим контролем (Tillquist et

al., 2020). Эссенциальные минералы выступают кофакторами ферментативных реакций и структурными компонентами белков, обеспечивая поддержание ионного равновесия (Агаджанян, Скальный, 2001; Оберлис и др., 2008; Хенниг, 1976). При этом способность особи поддерживать минеральный баланс и эффективно работать барьерным системам в условиях техногенной нагрузки является прямым свидетельством её высокой экологической адаптивности (Фролов, Завьялов, 2024; Абилов и др., 2021).

Для селекции принципиально важно, что характер аккумуляции элементов не носит видоспецифичного константного характера, а демонстрирует выраженную межпородную и внутривидовую изменчивость. Отечественные исследователи неоднократно доказывали, что различия в абсорбции, депонировании и элиминации минералов во многом обусловлены полиморфизмом генов, кодирующих белки-транспортеры и ферменты биотрансформации (Мирошников, Сизова, 2017; Шейко, 2021; Зиновьева и др., 2019; Фролов и др., 2022). Наличие такой генетической вариативности открывает широкие возможности для направленного отбора. В настоящее время методы полногеномного поиска ассоциаций (GWAS) и маркер-ассоциированной селекции позволяют не только подтверждать наследуемость элементного статуса, но и идентифицировать специфические SNP-локусы, связанные с метаболизмом конкретных минералов (Донник и др., 2023; Кошцаев, Аврахам, 2025).

К сожалению, в практической племенной работе интерьерные биомаркеры минерального обмена зачастую остаются без внимания. Успешная интеграция элементного статуса в селекционные программы невозможна без систематизации данных о физиологических нормах накопления элементов с обязательной поправкой на породную принадлежность и генотип (Калашников и др., 2017; Нарожных, 2019). Более того, односторонний отбор, направленный исключительно на форсирование продуктивных качеств в ущерб гомеостатическим функциям, способен

провоцировать нежелательные коррелированные сдвиги. Это выражается в истощении пула эссенциальных нутриентов и одновременном снижении резистентности к экотоксикантам (Абилов и др., 2024; Дунин, 2025).

Внедрение биомаркерных технологий в селекционный процесс диктует необходимость оптимизации выбора биологических матриц. Если гематологические показатели фиксируют лишь сиюминутный метаболический срез, то производные кожи (волос, шерсть) выступают в роли своеобразного «ретроспективного календаря», депонирующего информацию о минеральном обмене за продолжительный временной интервал (Мирошников и др., 2016; Фролов, 2021; Завьялов, 2020). Применение волосяного покрова в качестве неинвазивного субстрата для мониторинга, концептуально обоснованное и развитое в исследованиях В.Л. Петухова, К.Н. Нарожных, О.С. Короткевич и их коллег, даёт возможность проводить массовый скрининг поголовья. Такой подход позволяет оценивать генетическую предрасположенность к аккумуляции элементов в условиях, исключающих технологический стресс у животных (Петухов и др., 2019; Коновалова, 2017).

Исходя из вышеизложенного, изучение фенотипической изменчивости, корреляционных связей и наследуемости эссенциальных микроэлементов и токсикантов в органах и тканях крупного рогатого скота в специфических биогеохимических провинциях представляет собой актуальную научную проблему, что предопределило постановку первой задачи данной работы. Учитывая генетическую детерминацию барьерно-накопительных функций, включение элементного статуса в систему селекционных критериев требует создания доступных методов прижизненного мониторинга. Установление взаимосвязей между концентрацией химических элементов в биосубстратах и биохимическим профилем крови, а также анализ закономерностей их межорганного распределения, послужит теоретической базой для разработки критериев косвенной оценки минерального обмена и решения второй задачи исследования.

1.1.1. Железо: биологическая роль, метаболические пути, тканевая аккумуляция и взаимодействие с другими элементами

Железо выступает неотъемлемым компонентом гема — простетической группы гемоглобина, миоглобина, цитохромов, каталазы и пероксидазы (Ершов и др., 2020). Участвуя в переносе кислорода и детоксикации перекисей, оно служит чувствительным индикатором интенсивности обменных процессов (Авцын и др., 1991; Xue et al., 2020; Ghafourian et al., 2020). Содержание железа в тканях определяется экзогенным поступлением и генетически контролируемые механизмы всасывания, транспорта и депонирования, что делает его показателем с высокой наследуемостью (Лохматова, Сметанина, 2017).

Снижение продукции гепсидина приводит к развитию гемохроматоза — патологическому избыточному накоплению железа в паренхиматозных органах, обусловленному мутациями в генах *TfR2*, *HFE*, *HFE2* и *HAMP* (Kris, 2020). Биодоступность железа снижают фитаты, тяжёлые металлы (кадмий, ртуть) и избыток кальция и фосфора; активаторами усвоения служат витамин С, витамин А, фолиевая кислота и оптимальный уровень белка в рационе (Авцын и др., 1991; Ghafourian et al., 2020). Примерно четверть абсорбированного железа откладывается в организме, концентрируясь преимущественно в печени и мышцах (Valenzuela et al., 2008; Зайко, 2014). При дефиците рациона и повышенных физических нагрузках у животных значительно снижается накопление Fe, Zn, Cu, Mn в органах и тканях (Алиджанова и др., 2010). Фундаментальное значение имеет тот факт, что железо не синтезируется в организме, а поступает исключительно с пищей и водой, при этом избыточное его депонирование в печени и селезёнке может провоцировать гемосидероз (Авцын и др., 1991).

По данным Cabrera et al. (2010), содержание железа в мышечной ткани быков разных пород (герефорд, брафорд, голштинская) варьирует от 18,5 до 21,5 мг/кг. При этом концентрация Fe в печени, почках, селезёнке и других

органах значительно превышает уровень в мышечной ткани, что отражает различную барьерно-накопительную функцию органов и генетически детерминированную специфику депонирования данного элемента. Значимые различия в содержании железа в мясе молодых быков разных пород (польская красная, белогрудая, польская чёрно-пёстрая, симментальская, голштинская), продемонстрированные Litwińczuk et al. (2015), подтверждают влияние генофонда породы на минеральный состав мясной продукции. При этом зарубежные GWAS-исследования выявили QTL, ассоциированные с уровнем Fe в мышцах, на хромосомах 12, 14 и 16 (Mateescu et al., 2013; Tizioto et al., 2015).

Взаимосвязь железа с другими элементами имеет важное значение для оценки минерального статуса. Наиболее изученным является антагонизм между железом и цинком: одновременное употребление этих элементов в составе биологически активных добавок может снижать положительное воздействие каждого из них (Kordas et al., 2004). Аскорбиновая кислота повышает эффективность всасывания Fe (Торшин и др., 2010). На пути всасывания железа в кишечнике с ним конкурируют другие металлы — свинец, марганец, кобальт и цинк (Шошина и др., 2021). Свинец нарушает механизмы поглощения организмом железа посредством конкурентного ингибирования и препятствует биосинтезу гема (Мирзоев и др., 2018; Fujiwaraab et al., 2020). Установлено, что кобальт способствует улучшению усвояемости железа, ускоряя включение атома Fe в гемоглобин (Алиджанова и др., 2010).

1.1.2. Цинк: биологическая роль, метаболические пути, тканевая аккумуляция и взаимодействие с другими элементами

Цинк занимает второе место после железа по биологической ценности в организме животных (Хенниг, 1976; Chasapis et al., 2012). Эссенциальный микроэлемент, необходимый для нормального функционирования организма, Zn выступает кофактором более чем в 300 ферментах и белках (Miranda et al.,

2006; King, 2010; Bolan et al., 2025). Цинк играет существенную роль в метаболизме белков и нуклеиновых кислот, процессах транскрипции и стабилизации нуклеиновых кислот, репарации ДНК и регуляции экспрессии генов (Скальный, Рудаков, 2005; Chan et al., 1998; Нарожных, 2019). Большая часть цинка концентрируется в скелетной мускулатуре (60 %), а 30 % — в костях (Громова и др., 2010).

По данным Нарожных (2019), в лёгких быков герефордской породы среднее содержание цинка составляет 19,95 мг/кг. В мышечной ткани у черно-пёстрых быков содержится 53,0 мг/кг Zn, а у герефордов — 46,9 мг/кг (Нарожных и др., 2015a). В печени свиней разных пород концентрация цинка колеблется от 186,8 до 241,8 мг/кг (Темираев и др., 2015). Концентрация Zn в лёгких бычков герефордской породы равна 20,0 мг/кг, у черно-пёстрых — 20,2 мг/кг (Нарожных и др., 2014; Коновалова, 2017). У яков в лёгких аккумулируется 87,4 мг/кг Zn — значение, превосходящее показатели КРС в 4 раза (Кузьмина, 2013). Низкий коэффициент вариации цинка в лёгочной ткани ($C_v = 13,2 \%$) косвенно указывает на более жёсткий генетический контроль гомеостаза данного элемента (Стрижкова, 2018). Породные различия в концентрации цинка в мышечной ткани и внутренних органах свидетельствуют о генетической детерминации его метаболизма: у герефордского скота содержание Zn в мясе достоверно отличается от показателей молочных пород (Нарожных и др., 2015a; Litwińczuk et al., 2015).

Взаимосвязь цинка с другими элементами и нутриентами имеет важное значение для оценки минерального статуса. На биодоступность Zn оказывают влияние фитиновая кислота, кальций, фосфаты, железо, медь, магний и марганец — факторы, ухудшающие усвоение. Кадмий и свинец способны нарушать цинк-зависимые метаболические пути (Rosenblum et al., 2020). Цинк в рационе оказывает антагонистическое влияние на усвоение меди (Грачева, 2009; Sloup, 2017): животные, получившие низкие дозы Zn, накапливали в организме больше Cu. Рацион с высокими концентрациями Zn, Fe и Ca снижает абсорбцию Cd из пищевых источников (Sloup, 2017).

Дефицит Zn может усиливать накопление и токсичность Cd (Brzóška, Moniuszko-Jakoniuk, 2001).

Применение кормовых добавок на основе хелатных соединений цинка (Танамин Zn) положительно влияет на минеральный обмен, интенсивность роста телят и воспроизводительную функцию высокопродуктивных коров (Лавринова и др., 2022), что подтверждает тесную связь генотипа с минеральным статусом организма. В рамках развития биомаркерных технологий Мирошников и соавторы (2016) разработали методы выявления элементозов крупного рогатого скота, включая оценку цинкового статуса, а Фролов (2021) обосновал новые подходы к повышению адаптационных качеств животных на основе изучения элементного статуса, что создаёт нормативную базу для оценки элементного статуса животных в селекционной практике.

1.1.3. Медь: биологическая роль, метаболические пути, тканевая аккумуляция и взаимодействие с другими элементами

Медь является важным элементом для обмена веществ у людей и животных (Thompson, 2018; Lopez-Alonso, 2020). Медь играет критическую роль в формировании соединительной ткани, синтезе миелина, а также в процессе интеграции железа в структуру гема, обеспечивая нормальное созревание эритроцитов (Нотова и др., 2020).

Барьерные функции печени и почек определяются экспрессией специфических транспортёров и металлотионеинов. Печень является главным органом аккумуляции и гомеостатического контроля меди. Физиологически нормальный её уровень у жвачных существенно выше, чем у моногастричных, и может достигать 63 мг/кг сырой массы, тогда как у свиней — около 20 мг/кг, у кур — всего 3,1 мг/кг (Engle, Spears, 2000; Bradley et al., 1983). В почках и миокарде КРС уровень Cu относительно стабилен (1,5–3,1 мг/кг). Мышечная ткань характеризуется низким содержанием меди: у КРС концентрация в мышцах варьирует от 0,4 до 1,8 мг/кг (Данилова, 2008;

Нарожных и др., 2015a).

В исследованиях Нарожных, Стрижковой и Коноваловой (2015), выполненных в условиях Западной Сибири на бычках черно-пёстрой, голштинской и герефордской пород, сила влияния породного фактора на содержание меди в длиннейшей мышце спины достигала $\eta^2 = 0,64$. При этом средние концентрации Cu в мясе герефордского скота достоверно превышали аналогичные показатели молочных пород. В лёгких быков герефордской породы среднее содержание меди составляет 2,02 мг/кг (Нарожных, 2019). По данным Pereira et al. (2018), содержание Cu в мясе достоверно различается у быков, разведённых для мясного и молочного направлений продуктивности. Miranda et al. (2006) установили значимые различия в содержании меди, цинка, железа и марганца в печени и почках КРС северной Испании, обусловленные породной принадлежностью.

Высокое содержание цинка в рационе снижает поглощение меди (ВНО, 1998): высокие дозы Zn (220–420 мг/кг) эффективно предотвращают токсикоз меди у ягнят. Избыточное поступление железа также выступает антагонистом усвоения Cu (Хенниг, 1976; Mullis et al., 2003). У жвачных биодоступность меди значительно зависит от молибдена и серы: в рубце под действием микроорганизмов образуются тиомолибдаты, прочно связывающие медь и делающие её недоступной для всасывания — основная причина вторичного дефицита Cu у КРС (Lopez-Alonso, 2020).

1.1.4. Марганец: биологическая роль, метаболические пути, тканевая аккумуляция и взаимодействие с другими элементами

Марганец представляет собой жизненно важный эссенциальный микроэлемент, необходимый для нормального функционирования организма (NRC, 1978, 2001; Aschner et al., 2005, 2007). У крупного рогатого скота герефордской породы, выращенного в экологически благоприятных условиях Западной Сибири, содержание марганца составило: в печени — 2,6 мг/кг, в почках — 1,0 мг/кг, в мышечной ткани — 0,2 мг/кг, в волосе — до 25 мг/кг

(Narozhnykh et al., 2024a). У свиней породы ландрас: 2,04 мг/кг в печени, 1,62 в почках, 0,13 в мышцах, до 26,91 в щетине (Зайко, Тарасенко, 2022). В Алтайском крае средняя концентрация Mn в мышечной ткани мясных животных составляет около $0,1 \pm 0,01$ мг/кг; наименьшие значения в говядине (до 0,052 мг/кг), более высокие — у свиней (до 0,17 мг/кг) (Рождественская и др., 2021).

Нарожных, Сысо и Коновалова (2024a) при исследовании герефордского скота установили особенности аккумуляции марганца, отличающие мясное направление продуктивности от молочного. В диссертации Фролова (2021) на основе изучения элементного статуса мясного скота различных пород разработаны подходы к оценке адаптационных качеств через анализ содержания марганца в шерсти. Мирошников, Фролов, Завьялов и др. (2016) предложили метод выявления элементозов КРС, включающий оценку марганцевого статуса организма.

Марганец способен конкурировать за связывание с белками в печени и почках, нарушая активность ферментных систем. Избыток Са и Р в рационе усиливает симптомы Mn-дефицита у жвачных, птиц и грызунов (Georgievskii et al., 1979). Клетчатка тормозит всасывание Mn, тогда как органический белок улучшает (Baker, Halpin, 1987). Железо тесно связано с марганцем: при Fe-дефицитных состояниях наблюдается усиленное всасывание Mn и его накопление в печени (Нарожных, 2019; Flanagan et al., 1980). Добавка органической формы Mn («Биоплекс Mn») в рацион бычков казахской белоголовой породы способствовала изменению профиля летучих жирных кислот в рубце и снижению образования метана на 26,4 % (Рязанов и др., 2023).

1.1.5. Свинец и кадмий как маркеры барьерной функции органов и экологической адаптивности

Свинец (Pb) представляет собой один из наиболее опасных токсикантов среди тяжёлых металлов. Общий объём ежегодных выбросов Pb в биосферу

оценивается примерно в 25 тыс. тонн от природных источников и около 440 тыс. тонн от промышленных предприятий (Боев и др., 2002; Tomović et al., 2017). Свинец не выполняет в организме ни одной известной полезной биохимической функции (Pal et al., 2015). До 90–95 % Pb депонируется в костной ткани; остальной объём локализуется в мягких тканях и крови, преимущественно в эритроцитах (Babalola et al., 2010). Период полувыведения варьируется от 10 до 30 лет (Зайко, 2014).

Аккумуляция свинца в органах и тканях происходит неравномерно. У КРС свинец преимущественно депонируется в печени, селезёнке и мышцах (Нарожных, 2017а). Установлено, что в лёгких быков герефордской породы среднее содержание Pb составляет 0,073 мг/кг (Нарожных, 2019). При этом оба показателя находятся в пределах допустимых уровней, установленных СанПиН 2.3.2.1078-01 и ТР ТС 034/2013. Уровень свинца в лёгких был почти в 2 раза выше, чем в мышцах и семенниках, но в 2 раза ниже, чем в печени и селезёнке. У свиней породы СМ-1 концентрация Pb в печени составляет 1,63 мг/кг, у северокавказской и крупной белой — около 1,93 мг/кг (Темираев и др., 2015). В миокарде свиней содержание Pb достигает 0,69 мг/кг, тогда как у герефордских быков — всего 0,055 мг/кг (почти в 13 раз ниже) (Зайко и др., 2013б; Нарожных, 2017а).

Взаимосвязь свинца с другими элементами и нутриентами имеет важное значение. Свинец активно взаимодействует с Ca, Fe, Zn, Cu, Se (Babalola et al., 2010; Jia et al., 2018). Вмешательство Pb в метаболизм железа повышает его абсорбцию, особенно на фоне Fe-дефицита (Аскарова, Нурмухамбетов, 2013). При одновременном поступлении Zn и Pb последний может усиливать токсические эффекты (Уразаев и др., 1990). Кальций и фосфаты, наоборот, способны снижать всасывание свинца (Briffa et al., 2020). Беременность, лактация, дефицит Ca или Fe значительно увеличивают вероятность активного усвоения Pb (Chernitskiy, Skogoreva, 2020). Свинец нарушает механизмы поглощения организмом железа посредством конкурентного ингибирования и препятствует биосинтезу гема (Мирзоев и

др., 2018).

Кадмий (Cd) является значимым экологическим токсикантом, демонстрирующим выраженную способность к биоаккумуляции в организмах (Алмабаев и др., 2014; Gwaltney-Brant, 2016). До 50 % Cd, попадающего ингаляционным путём, оседает в лёгких; в ЖКТ абсорбция составляет около 5 % (Алмабаев и др., 2014). В силу сходства химических свойств с Zn, Cd способен вмешиваться в функционирование металлоферментов, вытесняя Zn из активных центров (Yang, Shu, 2015). Около трети всего кадмия, попадающего в организм, откладывается в почках и печени (Алмабаев и др., 2014). У быков герефордской породы в почках обнаруживается 0,22 мг/кг Cd (Narozhnykh et al., 2016). В мышцах у КРС содержание Cd равно 0,023 мг/кг (Нарожных, 2019). Масштабное исследование крупного рогатого скота в Ирландии (n = 393) показало, что концентрация кадмия в почках варьировала от 0,040 до 8,630 мг/кг (в среднем 0,734 мг/кг), при этом 11,3 % животных превышали европейский максимальный уровень (1 мг/кг). Возраст, концентрация кадмия в почвах и регион были ключевыми предикторами накопления, а у животных младше трёх лет содержание Cd в почках, как правило, не превышало предельно допустимого уровня (Canty et al., 2014). У голштинской породы концентрация Cd в почках составляет 0,15 мг/кг (Федяев, Коновалова, 2019). У свиней разных пород содержание Cd в печени колеблется от 0,165 до 0,232 мг/кг, при этом показатели превышают МДУ (0,05 мг/кг) (Темираев и др., 2015).

Установлено, что в лёгких быков герефордской породы среднее содержание Cd составляет 0,0076 мг/кг (Нарожных, 2019). Нарожных установил ранжированный ряд накопления элементов в лёгких: $Cd < Pb < Cu < Zn$. Концентрация Cd в печени почти в 6 раз превышала его уровень в лёгких. Сам факт высокой вариабельности концентраций Pb и Cd между отдельными животными, выращенными в идентичных биогеохимических условиях, является убедительным доказательством генетической детерминации барьерно-накопительных функций. Взаимосвязь кадмия с

эссенциальными элементами определяет его токсикологическое значение. Кадмий способен замещать Zn в металлоферментах и металлосвязывающих белках. Он является мощным индуктором синтеза металлотioneина и обладает значительно более высоким сродством к его тиоловым группам, чем Zn (Satarug et al., 2010; Wang et al., 2021). Высокие концентрации Cd способны ингибировать абсорбцию Zn, Cu, Se и Fe, способствуя их недостаточности (Gwaltney-Brant, 2016).

1.1.6. Интегральная оценка элементного статуса как интерьерного маркера

Как показано выше (п. 1.1), элементный статус организма представляет собой полигенный интерьерный признак, наследуемость которого создаёт предпосылки для включения в селекционные программы. Для практической реализации этого подхода необходима разработка методологии интегральной оценки — перехода от анализа отдельных элементов к комплексной характеристике минерального гомеостаза животного.

Фундаментальной основой интегральной оценки служат референтные интервалы концентраций эссенциальных и токсичных элементов в различных биологических матрицах. Мирошников, Фролов, Завьялов и Курилкина (2019a) разработали справочные интервалы для шерсти мясного скота, а Мирошников, Завьялов, Фролов и др. (2019b) — для молочных коров, охватывающие Zn, Cu, Fe, Mn, Pb и Cd. Данные интервалы позволяют классифицировать животных по степени отклонения элементного статуса от физиологической нормы и выявлять субклинические элементозы (Фролов, 2021). Важным методическим достижением является разработка породоспецифичных нормативов, учитывающих межпородные различия в интенсивности аккумуляции элементов (Мирошников и др., 2016a).

Ключевым направлением интегральной оценки является использование производных кожи (волос, шерсть, щетина) в качестве биомаркерной матрицы. По сравнению с кровью, отражающей текущий метаболический статус, элементный состав волос интегрирует информацию о минеральном

обмене за период роста, поскольку включённые в кератиновую структуру элементы остаются неизменными (Beernaert et al., 2007; McLean et al., 2009). На этой основе разработаны патентованные способы прижизненной оценки: определение свинца в печени и селезёнке по концентрации калия и меди в волосе (пат. № 2421726), свинца в лёгких — по марганцу волоса (пат. № 2602915), свинца в мышцах (пат. № 2629605), кадмия в мышечной ткани по уровню цинка в сыворотке крови (пат. № 2426119) (Мирошников и др., 2017–2021; Петухов и др., 2019).

Методологически интегральная оценка базируется на коэффициентах аккумуляции (R_{io}) — отношении концентрации элемента в целевой ткани к его содержанию в контрольной матрице (сыворотке крови или волосах). Значения $R_{io} > 1$ свидетельствуют об активном депонировании элемента в данном органе и могут служить количественным критерием барьерно-накопительной функции. Нарожных (2019) показал, что коэффициенты вариации R_{io} для Pb и Cd в паренхиматозных органах достигают 39–45 %, что указывает на значительную межиндивидуальную вариабельность, имеющую генетическую основу. Данный подход позволяет ранжировать животных по степени выраженности барьерных функций и выявлять индивидуумы с повышенной устойчивостью к экотоксикантам.

Для количественной интеграции многомерных данных о содержании элементов в различных органах применяются суммарные индексы. Петухов, Эрнст и соавторы (2025) предложили методику расчёта интегрального индекса минерального статуса, учитывающего как эссенциальные элементы, так и экотоксиканты, с весовыми коэффициентами, отражающими биологическую значимость каждого элемента. Шейко (2021) обосновал включение интерьерных биомаркеров минерального обмена в комплексные селекционные индексы, что позволяет повысить эффективность оценки производителей и формировать стада, устойчивые к неблагоприятным факторам среды. Улимбашев и др. (2024) разработали алгоритм интегральной оценки адаптивного потенциала свиней по совокупности микроэлементных

маркеров, показавший высокую корреляцию с показателями продуктивности ($r = 0,72-0,84$).

Перспективным направлением является синтез элементных маркеров с геномными данными. Зиновьева и др. (2020) показали, что полигенные индексы (PGS), включающие SNP-маркеры, ассоциированные с минеральным обменом, объясняют до 15–20 % аддитивной генетической дисперсии элементных признаков, что превышает предсказательную способность традиционных племенных оценок. Интеграция фенотипических данных об элементном статусе с генотипической информацией открывает возможности для маркер-ассоциированной селекции на комплексную устойчивость к минеральному стрессу (Донник и др., 2023; Кощачев, Аврахам, 2025).

Таким образом, интегральная оценка элементного статуса представляет собой многоуровневую методологию, объединяющую референтные интервалы, коэффициенты аккумуляции, суммарные индексы и геномные технологии. Развитие данного направления в условиях Западной Сибири, характеризующейся сложной биогеохимической обстановкой, определяет актуальность создания региональных моделей интегральной оценки элементного статуса КРС.

1.2. Генетические аспекты накопления химических элементов в организме животных

Исторически вариация микроэлементного статуса сельскохозяйственных животных интерпретировалась преимущественно через влияние алиментарных факторов и региональной биогеохимической обстановки. Однако современный этап развития зоотехнической науки требует переосмысления данного подхода: тканеспецифичная аккумуляция как эссенциальных нутриентов, так и поллютантов представляет собой сложный полигенный интерьерный признак, архитектура которого жестко детерминирована наследственностью (Шейко, 2021; Петухов и др., 2025).

Фенотипическая реализация механизмов абсорбции, депонирования и элиминации химических элементов демонстрирует выраженную изменчивость не только на таксономическом, но и на внутривидовом уровне, что формирует теоретический базис для целенаправленной племенной работы (Эрнст, Зиновьева, 2008; Мирошников и др., 2018).

Результаты новейших количественно-генетических исследований подтверждают, что фенотипическая дисперсия минерального статуса базируется на аддитивном генетическом эффекте. При этом генетическому контролю подвержена не только средняя норма реакции признака, но и степень его чувствительности к средовым модуляторам: показатель наследуемости экологической дисперсии для минеральных характеристик у свиней, овец и крупного рогатого скота составляет порядка 0,10 (Misztal et al., 2021). В популяциях мясного скота породы нелоре (*Bos indicus*) коэффициенты наследуемости (h^2) концентраций меди, цинка и железа в длиннейшей мышце спины варьируют в пределах 0,29–0,36 (Tizioto et al., 2015; Afonso et al., 2019). В молочном скотоводстве наследуемость уровня кальция и цинка в молоке достигает 0,49–0,72 (Buitenhuis et al., 2015), тогда как у свиней аналогичный параметр для гематологических маркеров минерального обмена оценивается в 0,27–0,54 (Reyer et al., 2019). Для ангусского скота наследуемость концентрации железа в мышечной ткани составляет $0,48 \pm 0,08$ (Mateescu et al., 2013).

Методологическую основу оценки генетической архитектуры интерьерных признаков составляет математико-статистическое моделирование, позволяющее элиминировать аддитивную генетическую дисперсию из общего фенотипического разнообразия. Применение близнецового метода, полногеномного поиска ассоциаций (GWAS), расчета полигенных индексов (PGS) и полусибового анализа дает возможность верифицировать наследственную природу элементного статуса (Misztal et al., 2021; Ahmad et al., 2023). Особую ценность в селекции крупного рогатого скота представляет полусибовый анализ, базирующийся на сравнении

потомков одного производителя в стандартизированных условиях среды. Расчет коэффициента корреляции полусибсов (t) с последующим применением формулы $h^2 \approx 4t$ позволяет объективизировать долю генетической детерминации минерального обмена и обосновать возможность его включения в селекционные индексы.

Молекулярно-генетические механизмы гомеостаза микроэлементов реализуются через систему специфических транспортных протеинов и ферментов биотрансформации. В частности, транспортер двухвалентных металлов 1 (DMT1, ген SLC11A2) опосредует абсорбцию не только эссенциальных катионов (Fe^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+}), но и токсичных ионов (Cd^{2+} , Pb^{2+}), что молекулярно объясняет феномен конкурентного всасывания и гиперкумуляции экотоксикантов при железодефицитных состояниях (Тарасова и др., 2019; Fujiwara et al., 2020). Ключевую роль во внутриклеточной детоксикации и поддержании гомеостаза меди и цинка играют металлотионеины (MT-I, MT-II) — низкомолекулярные цистеин-богатые белки. Аллельный полиморфизм промоторных регионов генов металлотионеинов модулирует скорость их транскрипции, обуславливая тем самым межпородную дифференциацию по резистентности к медной и кадмиевой интоксикации (Lopez-Alonso, 2012; Lopez-Alonso et al., 2017, 2020; Зайко, 2014).

Элиминация токсичных металлов обеспечивается активностью системы глутатион-S-трансфераз (GSTs) и глутамил-цистеин лигазы (GCLC, GCLM), при этом нуклеотидные замены в генах GSTP1, GSTT1 и GSTM1 формируют межиндивидуальную вариабельность резистентности к накоплению свинца и ртути (Тарасова и др., 2019). Результаты полногеномного поиска ассоциаций (GWAS) идентифицировали локусы количественных признаков (QTL), контролирующие содержание железа на 12-й аутосоме (BTA12), которые объясняют до 6,5 % аддитивной генетической дисперсии, а также выявили плейотропные регионы, ассоциированные с накоплением различных минералов (Tizioto et al., 2015; Afonso et al., 2019). У скота породы ангус SNP-

маркеры, детерминирующие уровень цинка, картированы на хромосомах 1, 2, 7, 10, 15 и 28 (Mateescu et al., 2013).

Фундаментальное значение для разработки стратегий маркер-ассоциированной селекции (MAS) имеет явление плейотропии генов продуктивности и минерального обмена. В цикле исследований Е.И. Тарасовой с соавторами доказано, что полиморфизм K232A гена DGAT1 ассоциирован с вариацией содержания железа, марганца и цинка в волосах и сыворотке крови коров черно-пёстрой породы: носители генотипа AA характеризуются повышенными концентрациями Fe и Mn (Тарасова и др., 2024). Установлено, что полиморфизм rs8193046 гена TLR4 одновременно модулирует иммунный статус и минеральный гомеостаз: генотип GG коррелирует с более высоким уровнем Ca и P в сыворотке крови и сниженной аккумуляцией Cd (Тарасова и др., 2025). Анализ гена LRP4 показал, что гетерозиготное состояние GA сопровождается увеличением концентраций Fe, Mn и Zn в производных кожи (Тарасова и др., 2026).

Выявленные генетические ассоциации верифицируют гипотезу о том, что форсирование отбора исключительно по продуктивным качествам, без поправки на генетический статус минерального обмена, способно инициировать нежелательные коррелированные сдвиги в популяции (Denholm et al., 2022; Ahmad et al., 2023). Более того, традиционные геномные индексы племенной ценности (GEBV) не всегда в полной мере отражают адаптивный потенциал животных, что требует их модификации с учетом интерьерных биомаркеров (Басонов и др., 2024; Мурленков, Шендаков, 2025).

Резюмируя вышесказанное, следует констатировать, что тканевая аккумуляция химических элементов является высоконаследуемым интерьерным признаком ($h^2 = 0,27-0,72$), находящимся под полигенным контролем транспортных систем (DMT1, MT, GST) и подверженным плейотропному влиянию генов, ассоциированных с продуктивностью. Наличие надежной количественно-генетической базы обосновывает необходимость интеграции минерального статуса в селекционные

программы. Эффективность реализации генетического потенциала напрямую зависит от качества подбора родительских пар. В частности, при различных вариантах скрещивания у коров-первотелок голштинской породы степень реализации генетического потенциала по молочной продуктивности варьировала от 84,0 до 88,3 %, причем помесные животные, полученные от кроссированных линий, превосходили чистопородных сверстниц по удою на 6,4 % (Басонов и др., 2024). Следовательно, целенаправленное управление генетической структурой стада, в том числе с учетом интерьерных маркеров минерального обмена, является действенным резервом повышения продуктивности и адаптивности сельскохозяйственных животных.

1.3. Межпородные и внутripородные различия по микроэлементному статусу как проявление генетического разнообразия и влияние генотипа производителей на минеральный обмен у потомства

Фундаментальным фактором, детерминирующим количественные параметры тканеспецифичного накопления макро- и микроэлементов, является породная принадлежность. В исследованиях Нарожных, Стрижковой и Коноваловой (2015), выполненных в условиях Западной Сибири на бычках черно-пёстрой, голштинской и герефордской пород, сила влияния породного фактора на содержание меди в длиннейшей мышце спины достигала $\eta^2 = 0,64$. При этом средние концентрации Cu в мясе герефордского скота достоверно превышали аналогичные показатели молочных пород. По данным Cabrera et al. (2010), содержание железа в мышечной ткани быков разных пород варьирует от 18,5 до 21,5 мг/кг. Аналогичные закономерности межпородной дифференциации описаны Litwińczuk et al. (2015), продемонстрировавшими значимые различия в содержании макро- и микроэлементов в мясе молодых быков трёх польских аборигенных пород по сравнению с симментальской и голштинской.

Комплексный анализ аккумуляции Zn, Cu, Pb и Cd в лёгких быков

герефордской породы в возрасте 17–18 месяцев выявил выраженную избирательность в накоплении тяжёлых металлов: ранжированный ряд элементов в лёгочной ткани выглядит как $Cd < Pb < Cu < Zn$ (Нарожных, 2019). Содержание цинка в лёгких (19,95 мг/кг) было максимальным, а кадмия (0,0076 мг/кг) — минимальным, что закономерно, поскольку Zn является эссенциальным микроэлементом, а Cd — ксенобиотиком. При этом коэффициент вариации свинца достигал 39,6 %, а кадмия — 45,5 %, что свидетельствует о значительной межиндивидуальной изменчивости накопления токсичных элементов даже в генетически однородной группе животных, что является важнейшей предпосылкой для селекционного отбора (Нарожных, 2019).

Сравнительная характеристика уровня тяжёлых металлов в различных органах герефордского скота демонстрирует выраженный тканеспецифический характер депонирования. Концентрация свинца в лёгких была почти в 2 раза выше, чем в мышцах (0,038 мг/кг) и семенниках (0,032 мг/кг), но в 2 раза ниже, чем в печени (0,147 мг/кг) и селезёнке (0,137 мг/кг). Концентрация кадмия в печени почти в 6 раз превышала его уровень в лёгких. Содержание меди в селезёнке и мышцах было почти в 2 раза выше, чем в лёгких. Полученные данные объективизируют различную эффективность барьерных функций органов и подтверждают необходимость дифференцированного подхода к оценке интерьерного статуса (Нарожных, 2019).

Ключевым условием вовлечения интерьерного признака в селекционную программу выступает наличие достаточной генетической изменчивости внутри популяции. Анализ фенотипической изменчивости элементного статуса в лёгких герефордского скота выявил значительный размах варьирования. Отношение крайних вариантов по свинцу достигало 1:5,7, по кадмию — 1:3,8, по меди — 1:3,2, при этом по цинку вариабельность была существенно ниже (1:1,6). Такой размах индивидуальной изменчивости, сохраняющийся при стандартизированных

условиях кормления, прямо указывает на наличие скрытого генетического потенциала, который может быть мобилизован направленным отбором по устойчивости к биоаккумуляции (Нарожных, 2019).

Нормативную базу для диагностики и последующего отбора формируют референсные значения содержания Cu, Cd, Pb, Zn, Fe и Mn в селезёнке, печени, почках и мышцах черно-пёстрого скота, установленные в работах Стрижковой (2018) и Коноваловой, Стрижковой, Короткевич (2014). Зарубежные полногеномные исследования подтверждают, что концентрации минералов в мышечной ткани обладают умеренной и высокой наследуемостью: в популяции скота нелоре h^2 содержания Cu, Zn и Fe варьировала от 0,29 до 0,48 (Tizioto et al., 2015).

Генетическая детерминация продуктивных и адаптивных качеств подтверждается при изучении развития молодняка отечественных пород. При сравнении линейных групп породы Сибирячка установлено, что по типу телосложения животные различных линий подходят к молочному типу, однако коровы-первотелки линии Раймонда 1021 превосходят сверстниц линии Витража 5293 по удою за 305 дней лактации на 179 кг (Адушинов, Коптилов, 2025), что верифицирует значимый вклад генотипа в формирование не только экстерьерных, но и физиологических признаков.

В контексте генетико-селекционных аспектов микроэлементного статуса свиней кемеровской породы доказано, что генофонд семейств и линий достоверно влияет на накопление свинца и железа в скелетной мускулатуре, миокарде, лёгких и почках. Это служит прямым доказательством роли наследственности в регуляции аккумуляции металлов. Более того, выявленное негативное влияние повышенных уровней кадмия и свинца в скелетной мускулатуре на рост свиней в раннем онтогенезе подчёркивает практическую значимость учёта элементного статуса как критерия отбора (Назаренко, 2024).

Оценка влияния генотипа отцов на интерьерные признаки потомков служит валидным инструментом верификации наследственной природы

признака. Данный подход последовательно реализовывался в фундаментальных работах по генетике сельскохозяйственных животных (Эрнст, Петухов, Гудилин, Нарожных, Зайко и др.). Эффективность селекции, по оценкам ряда авторов, на 60–70 % и более определяется использованием проверенных по потомству производителей (Колесникова, Басонов, 2017). В частности, генотип голштинских быков-производителей различной селекции достоверно модифицирует продуктивные показатели черно-пёстрого скота, получаемого в результате межпородного скрещивания (Басонов, Колесникова, 2016).

На свиньях породы СМ-1 впервые была охарактеризована специфика генофонда линий по интенсивности аккумуляции свинца в органах и тканях, что позволило установить достоверные различия потомков разных хряков-производителей по уровню депонирования Pb (Зайко, Коновалова, 2013в). Математическое обоснование влияния генотипа отца на комплекс интерьерных показателей потомков представлено в работах Е.В. Камалдинова (2012). Теоретические основы учёта признаков интерьера в селекции заложены в монографии И.И. Гудилина, В.Л. Петухова и Т.А. Дементьевой (2000).

Универсальность выявленной закономерности, заключающейся в том, что генотип производителя формирует микроэлементный профиль потомства независимо от вида животного, подтверждена при исследовании свиней (Короткевич, Желтикова, Петухов, 2009; Зайко и др., 2017) и овец (Коновалова, Донченко, 2024б). При этом изучение породных и региональных особенностей развития отечественного животноводства актуализирует необходимость сохранения локальных пород как уникального генофондного ресурса, адаптированного к специфическим условиям различных регионов страны (Амерханов и др., 2025).

Понимание механизмов межэлементного обмена и выявления биомаркеров требует изучения взаимосвязей между уровнями химических элементов в различных органах и тканях. Установлен ряд положительных

корреляций между содержанием элементов в лёгких герефордского скота: Cd–Pb ($r = 0,52$); Cd–Zn ($r = 0,67$); K–Cd ($r = 0,60$); K–Zn ($r = 0,52$) (Нарожных, 2019).

Связь кадмия с цинком и калием указывает на взаимозависимость этих элементов в обмене веществ. Токсикодинамика кадмия связана с нарушением обмена цинка: недостаточное содержание Zn может способствовать увеличению негативного действия Cd даже при низких экспозициях. Положительная ассоциация кадмия и свинца может указывать на их синергический негативный эффект. При одновременном введении в рацион крыс ацетата свинца и хлорида кадмия отмечён эффект токсического синергизма, выражающийся в усилении перекисного окисления и повреждении митохондрий почек (Кроль, 2000).

Сопряженность аккумуляции тяжёлых металлов в различных тканях черно-пёстрого скота, выявленная в исследованиях Мирошникова (2016) и Нарожных (2017a), интерпретируется как проявление плеiotропного действия генов, контролирующих транспортные белки. Различные по величине и направлению фенотипические корреляции между концентрацией химических элементов в щетине, копытном роге и внутренних органах свиней также подтверждают сложную архитектуру данного признака (Назаренко, 2024).

Интеграция данных о микроэлементном статусе в системы оценки племенной ценности сопряжена с необходимостью решения ряда методологических задач. Во-первых, необходима репрезентативная база референсных значений для каждой породы и региона (Сысо, 2017б; Ильин, Сысо, 2001). Во-вторых, критически важна разработка неинвазивных методов прижизненной оценки интерьерных признаков. Использование производных кожи в качестве биомаркерной матрицы, предложенное школами Петухова, Скального, Мирошникова, Калашникова (Коновалова, 2017; Мирошников и др., 2018), позволяет проводить массовый скрининг без стрессового воздействия на животных. В-третьих, требуется валидация корреляционных

моделей, связывающих элементный профиль волоса и сыворотки крови с содержанием металлов в паренхиматозных органах (Стрижкова, Коновалова, Короткевич, 2011, 2017).

Доказано, что корреляции между концентрацией ряда химических элементов в щетине и копытном роге свиней с уровнем элементов в органах и тканях позволяют рекомендовать использование производных кожи в качестве индикатора минерального статуса организма. В практическом аспекте целесообразно более широко использовать в селекционной работе животных из семейств и линий, устойчивых к накоплению свинца, с целью получения экологически безопасной продукции (Назаренко, 2024).

1.4. Методы оценки интерьерных признаков в селекции: связь элементного гомеостаза с продуктивностью, адаптивностью и неинвазивная диагностика

Интеграция биохимических маркеров в системы оценки племенной ценности базируется на том, что стабильность элементного гомеостаза жестко детерминирована активностью транспортных белков и ферментных систем. Трансферрин и церулоплазмин, обеспечивающие транспорт железа и меди, выступают не только как физиологические регуляторы, но и как потенциальные индикаторы генетически обусловленной эффективности минерального обмена (Авцын и др., 1991; Нотова и др., 2020; Collins, Klevay, 2011). Активность щелочной фосфатазы, зависящая от цинка и магния, служит надежным индикатором интенсивности пластического обмена (Ansari, 2022).

Традиционные гематологические параметры (гемоглобин, гематокрит) и клинико-биохимические показатели (АсАТ, АлАТ, ГГТ, ЛДГ), отражающие функциональное состояние паренхиматозных органов, обладают высокой корреляционной связью с тканевой аккумуляцией эссенциальных нутриентов и экотоксикантов (Громыко, 2005; Титов, 2017; Рослый, 2015; Полозюк, Ушакова, 2019). Это открывает перспективы для косвенной селекции на

устойчивость к биоаккумуляции тяжелых металлов через стандартные панели биохимического скрининга. В условиях экстремального климата Сибири физиологический статус лактирующих коров, оцениваемый по комплексу данных показателей, имеет выраженную породную и генотипическую специфику (Жучаев и др., 2016).

Фундаментальным обоснованием возможности косвенной оценки интерьерных признаков служит выявленная сопряженность между концентрацией металлов в паренхиматозных органах и активностью ферментов крови. В частности, доказано, что содержание кадмия в печени достоверно коррелирует с активностью АлАТ, а уровень меди в мышцах — с концентрацией церулоплазмينا в сыворотке (Мирошников и др., 2016; Нарожных, 2017а). Подобные закономерности позволяют формировать регрессионные модели прогнозирования тканевого депонирования элементов по гематологическим срезам. У свиней кемеровской породы показатели цитолиза (АсАТ, АлАТ) и клубочковой фильтрации (креатинин) имеют надежные положительные связи с уровнем элементов в щетине, что подтверждает возможность использования малоинвазивных биомаркеров для ранней диагностики токсических нагрузок и отбора устойчивых генотипов (Назаренко, 2024).

Минеральный гомеостаз выступает лимитирующим фактором реализации генетического потенциала продуктивности и долголетия. Железо, цинк, медь и марганец, интегрированные в антиоксидантные и метаболические каскады, определяют кислородтранспортную емкость тканей и скорость регенерации (Schwarz, 2013; Camaschella, 2015; Chasapis et al., 2012; Kaur et al., 2014; Aschner et al., 2007). Нарушение элементного баланса неизбежно ведет к снижению адаптивного потенциала и преждевременной выбраковке. Продуктивное долголетие коров, являющееся интегральным показателем эффективности селекции, критически зависит от породной принадлежности и генетически детерминированных особенностей метаболизма (Исаева и др., 2025). Форсирование отбора по молочной

продуктивности без учета минерального статуса приводит к резкому сокращению сроков хозяйственного использования: при удоях свыше 9000–10000 кг продолжительность эксплуатации падает до 2–3 лактаций, что наносит существенный экономический ущерб (Бекенев, 2019). Следовательно, пролонгация хозяйственного использования высокопродуктивных животных требует целенаправленного отбора по признакам устойчивости минерального обмена.

Важнейшим селекционным критерием адаптивности выступает барьерная функция органов. Лёгочная ткань, аккумулируя свинец и кадмий, защищает системный кровоток от токсического воздействия, при этом гомеостаз цинка в лёгких отличается низкой вариабельностью ($C_v = 13,2 \%$), что свидетельствует о жестком генетическом контроле данного признака (Нарожных, 2019). Стабильность цинкового пула критически важна для поддержания иммунного статуса, что делает его перспективным маркером для отбора на общую резистентность.

Ключевым прорывом в биомаркерных технологиях селекции стало обоснование и внедрение методов неинвазивной оценки элементного статуса через анализ производных кожи (шерсти, волоса, щетины). Дериваты кожи интегрально отражают метаболические процессы за длительный период, поскольку включенные в кератиновые структуры элементы не подвержены дальнейшему метаболизму (Beernaert et al., 2007; McLean et al., 2009; Патрашков, 2003). Комплексные исследования элементного состава шерсти мясного и молочного скота позволили установить достоверные корреляции между концентрацией металлов в волосяном покрове и их уровнем во внутренних органах, крови, а также показателями продуктивности (Фролов, 2021; Нарожных и др., 2015в). На основе этих данных сформирована нормативная база референтных интервалов концентраций эссенциальных и токсичных элементов в шерсти для различных пород и направлений продуктивности (Мирошников и др., 2016; Мирошников и др., 2018).

Практическая реализация данных подходов закреплена в ряде патентов

РФ, описывающих способы зоотехнического отбора животных с высоким адаптивным потенциалом по элементному составу шерсти (Мирошников и др., 2017в; Мирошников и др., 2021). В сибирской научной школе (В.Л. Петухов, О.С. Короткевич, Е.В. Камалдинов, К.Н. Нарожных, О.И. Себежко, М.В. Стрижкова, А.В. Назаренко и др.) масштабное развитие получило направление регрессионного моделирования для прогнозирования тканевой аккумуляции токсикантов. Созданы математические модели, позволяющие с высокой степенью точности ($R^2 = 0,44\text{--}0,56$) прогнозировать содержание свинца и кадмия в печени и мышцах по их концентрации в легких, щетине или сыворотке крови (Нарожных, 2019; Назаренко, 2024). Запатентованы способы прижизненного определения уровня тяжелых металлов в паренхиматозных органах по элементному составу производных кожи и биожидкостей: свинца в печени и селезёнке по концентрации калия и меди в волосе (Короткевич и др., 2011а), свинца в лёгких — по марганцу волоса (Коновалова и др., 2016а), свинца в мышцах (Нарожных и др., 2017б), кадмия в мышечной ткани по уровню цинка в сыворотке крови (Короткевич и др., 2011б). Аналогичные подходы апробированы для щетины свиней (Петухов и др., 2006; Петухов и др., 2008) и чешуи рыб (Короткевич и др., 2015б). Таким образом, интеграция неинвазивных биомаркерных технологий в селекционные программы открывает новые возможности для формирования экологически безопасного и генетически устойчивого к техногенным нагрузкам поголовья сельскохозяйственных животных.

1.5. Биогеохимические провинции и их влияние на фенотипическую изменчивость интерьерных признаков

Формирование микроэлементного статуса сельскохозяйственных животных детерминировано не только аддитивным действием генов, но и сложным взаимодействием «генотип × среда» ($G \times E$). Биогеохимические провинции (БГП), представляющие собой географические области со стабильными различиями в химическом составе почв, вод и растительности,

выступают в роли специфического экологического фильтра (Marshinskaia et al., 2021). В парадигме популяционной генетики и селекции биогеохимические провинции не должны рассматриваться исключительно как источник токсикантов; прежде всего, это фактор среды, модифицирующий фенотипическое проявление интерьерных признаков и определяющий диапазон реализации генетического потенциала породы (Klingenberg, 2019; Rovelli et al., 2020).

Территория Западной Сибири характеризуется сложным геохимическим строением, обусловленным чередованием древних кристаллических пород, осадочных толщ мезозоя и кайнозоя, а также современными процессами почвообразования (Сысо, 2007; Ильин, Сысо, 2001). Формирование специфического селекционного давления обусловлено сочетанием природных геохимических аномалий и антропогенного воздействия, что создает провинции с различным режимом биологического круговорота микроэлементов, непосредственно влияющим на минеральное питание животных (Ильин, 2012; Тютиков, 2019).

На молекулярном уровне взаимодействие $G \times E$ в минеральном обмене реализуется через эпигенетические механизмы. Внешнесредовые факторы способны индуцировать изменения метилирования ДНК и модификации гистонов, модулируя транскрипционную активность генов, связанных с метаболизмом микроэлементов (Capra et al., 2023; Denoyelle et al., 2021). Экстремальные температурные воздействия вызывают окислительный стресс и изменяют элементный статус: на фоне теплового стресса в волосах отмечается снижение концентрации эссенциальных элементов (K, Ca, Mg, Mn) при одновременном повышении уровня токсичных (Pb, Cr, As) (Фролов, Завьялов, 2024).

Исследования, проведённые в различных регионах Западной Сибири (Новосибирская область, Кемеровская область, Алтайский край, Республика Тыва), демонстрируют значительную изменчивость содержания тяжёлых металлов в почвах, воде, кормах и, как следствие, в органах и тканях

сельскохозяйственных животных (Сысо, 2007; Ильин, Сысо, 2001; Рождественская и др., 2009, 2019, 2021). При этом на фоне региональных различий сохраняются породные и индивидуальные особенности элементного статуса, что свидетельствует о доминирующей роли генетических факторов и обосновывает возможность целенаправленного отбора (Нарожных, 2019).

В Кемеровской области, характеризующейся повышенным техногенным воздействием угледобывающей промышленности, отмечается более высокое содержание свинца и кадмия в почвах и кормах по сравнению с другими регионами Сибири (Сысо и др., 2016в). Изучение элементного статуса крови голштинского скота в условиях Кемеровской области показало, что повышенный фон тяжёлых металлов в окружающей среде достоверно отражается на минеральном обмене животных, что требует применения селекционных подходов для формирования устойчивых к экотоксикантам генотипов (Шишин и др., 2017). Эколого-биогеохимическая оценка почв, кормов и воды (Сысо и др., 2016в, 2017; Petukhov et al., 2016; Narozhnykh et al., 2016) подтвердила, что уровни токсичных элементов в большинстве случаев находятся в пределах нормативных значений. При этом локальный геохимический фон, характеризующийся повсеместным снижением концентрации меди и цинка в кормовых культурах на фоне умеренного техногенного прессинга (Нарожных, 2019), формирует уникальное селекционное давление. Именно в таких условиях фенотипическая изменчивость по уровню накопления тяжёлых металлов становится индикатором скрытого генетического разнообразия (Petukhov et al., 2016).

В работе Нарожных (2019) подчёркивается, что накопление тяжёлых металлов в органах сельскохозяйственных животных не является стохастическим процессом, а подчиняется определённым закономерностям, отражающим специфику биогеохимических провинций и генетический потенциал породы. Барьерные функции органов, контролируемые генетическими механизмами, определяют специфику депонирования

элементов в различных тканях.

Антропогенное воздействие создает дополнительный селективный пресс на популяции сельскохозяйственных животных. Особи с более эффективными барьерно-накопительными механизмами демонстрируют повышенную резистентность к экзогенной нагрузке, что закрепляется на генетическом уровне (Донник, Смирнов, 2001; Абилов и др., 2021). Сравнительный анализ элементного статуса яков в различных экологических зонах Республики Тыва (Кузьмина, 2008, 2013) показал, что межпопуляционная изменчивость в аккумуляции элементов сохраняется на фоне различий в кормовой базе, отражая адаптивную дифференциацию генофонда (Чысыма, 2006).

Для селекционно-племенной работы понимание взаимодействия $G \times E$ имеет фундаментальное значение. Отбор животных исключительно по средним показателям продуктивности без учёта их способности поддерживать минеральный гомеостаз в условиях конкретной БГП может привести к непреднамеренным коррелированным сдвигам и снижению общей адаптивности (Mulder et al., 2008; Capra et al., 2023). Генетическая дисперсия по признакам накопления элементов может по-разному реализовываться в различных провинциях из-за различий в антагонистических взаимодействиях элементов (например, Cu-Mo-S) в рационе, что требует разработки региональных селекционных индексов с обязательной поправкой на биогеохимический фон (Rovelli et al., 2020).

1.6. Цитогенетические маркеры генетического здоровья животных

В современных парадигмах племенной работы комплексная оценка интерьерных признаков немыслима без глубокого анализа кариотипического статуса популяций. Цитогенетические биомаркеры, объективизирующие стабильность наследственного аппарата на уровне хромосомных структур, служат высокочувствительными индикаторами скрытого генетического груза, адаптивного резерва и популяционной резистентности к средовым

стрессорам (Жигачев, 1984; Бакай, 1995; Куликова, 1998; Кочнева, 2017; Зиновьева и др., 2019).

Феномен соматической хромосомной нестабильности (CIN) трактуется как повышение частоты структурных и числовых хромосомных aberrаций в пролиферирующих клетках организма (Dzitsiuk et al., 2019; Samsonov, 2020). Спектр цитогенетических нарушений включает полиплоидию, анеуплоидию, фрагментацию хромосом, межхромосомные обмены и формирование микроядер (Куликова, 1998; Кочнева, Бутеева, 2015). Уровень спонтанных хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови валидирован как надежный прогностический биомаркер воспроизводительной способности и общей жизнестойкости животных (Жигачев, 1984; Бакай, 1995; Камалдинов, 2012).

Глобальный цитогенетический скрининг традиционно фокусируется на идентификации конституциональных хромосомных аномалий. Хрестоматийным примером служит робертсоновская транслокация rob(1;29) у крупного рогатого скота, носительство которой достоверно ассоциировано со снижением оплодотворяемости на 5–7 % (Жигачев, 1984; Iannuzzi et al., 2021; Gustavsson, 2009). Аналогично, в популяциях племенных хряков свиней распространённость сбалансированных реципрокных транслокаций достигает 0,47 %, что требует жесткого контроля при бонитировке (Ducos et al., 2007; Kerka et al., 2023).

Экзогенные тяжёлые металлы обладают выраженной кластогенной активностью, индуцируя хромосомные aberrации в соматических клетках (Alimba et al., 2016; Давыдова, Тагасов, 2002). Каскад генотоксических реакций опосредован индукцией реактивных форм кислорода, супрессией ДНК-репаративных ферментов и дестабилизацией полимеризации тубулина (Bertin, Averbeck, 2006).

Труды отечественной школы цитогенетиков (Эрнст, Жигачев, Бакай, Куликова, Кочнева, Камалдинов и др.) неопровержимо доказали, что частота соматических хромосомных нарушений у сельскохозяйственных животных

интегрально отражает экологическое неблагополучие ареала. В условиях Западной Сибири фоновые показатели цитогенетического статуса крупного рогатого скота черно-пёстрой породы имеют строго определенную частоту хромосомных aberrаций (Куликова, 1998). При этом в зонах с профилирующей антропогенной нагрузкой показатель хромосомных aberrаций возрастает в 1,5–2,0 раза, формируя прямую корреляцию со снижением воспроизводительной функции и гипераккумуляцией тяжёлых металлов в тканях (Куликова, 2015; Кочнева, 2005).

Эмпирически подтверждено, что повышение концентраций кадмия и меди в печени и селезёнке быков достоверно ассоциировано с ростом частоты полиплоидии, тогда как накопление свинца и хрома коррелирует с увеличением числа клеток с микроядрами и нуклеоплазматическими мостами (Alimba et al., 2016). Вместе с тем, чувствительность к генотоксическому действию тяжёлых металлов значительно варьирует между отдельными особями, что базируется на генетически детерминированных различиях в активности систем детоксикации и репарации ДНК. Именно полиморфизмы в генах металлотионеинов и глутатион-S-трансфераз лимитируют индивидуальную восприимчивость к хромосомному повреждению (Тарасова и др., 2019; Колесникова и др., 2013).

Существенное влияние на исходный уровень хромосомной нестабильности оказывает породная принадлежность. Фундаментальные исследования М.Л. Кочневой (2005) продемонстрировали, что у быков-производителей красной степной породы частота полиплоидии составляет 7,75 %, тогда как у черно-пёстрого и симментальского скота этот показатель нивелируется до 2,65 и 2,79 % соответственно. Наиболее высокие значения хромосомной нестабильности (до 17,0 %) зарегистрированы у серого украинского скота, подвергнувшегося интродукции в Сибирь, что свидетельствует о перманентном процессе адаптации завозимых генотипов (Камалдинов, 2010).

У молочного скота, разводимого в относительно экологически чистых

районах Западной Сибири, частота полиплоидии стабилизируется в пределах 2,7–9,7 %, что обосновывает возможность использования данного показателя в качестве популяционного референсного значения (Куликова, 1998; Кочнева, Бутеева, 2015). Инкорпорация цитогенетических маркеров в комплексную систему оценки позволяет верифицировать животных с оптимальным балансом адаптивных и продуктивных качеств.

Взаимосвязь между уровнем тяжёлых металлов в органах и цитогенетическим статусом носит многовекторный характер: гипераккумуляция токсичных металлов прямо индуцирует хромосомные повреждения; напротив, эффективные барьерные механизмы детерминируют низкую частоту аббераций. Данная парадигма создаёт теоретико-методологическую основу для комплексной оценки резистентности животных с одновременным использованием как элементных, так и цитогенетических маркеров.

Наряду с анализом хромосомных аббераций, оценка генетического здоровья популяций требует изучения популяционно-генетических параметров: уровня гетерозиготности, эффективного размера популяции (N_e), неравновесия по сцеплению (LD) и серий гомозиготности (ROH) (Olschewsky et al., 2021; Al-Mamun et al., 2015). Синергия цитогенетического скрининга с методами полногеномного анализа позволяет сформировать многоуровневую систему мониторинга генетического здоровья стад (Crooijmans et al., 2025; Iannuzzi et al., 2023).

1.7. Современные методы геномной селекции и неинвазивной диагностики по интерьерным признакам

Модернизация животноводства требует смещения фокуса с традиционной бонитировки на глубокий анализ интерьерных характеристик. Элементный статус организма, отражающий способность к гомеостазу эссенциальных нутриентов и детоксикации поллютантов, выступает классическим примером сложного полигенного интерьерного признака

(Denholm et al., 2022). Современная стратегия селекции опирается на синергию молекулярно-генетической паспортизации, полногеномной оценки (GWAS) и неинвазивной фенотипической диагностики.

Основой геномной селекции служит достоверная идентификация породной принадлежности и контроль аллелофонда. Эволюция методов от анализа групп крови к микросателлитам (STR-локусам) и полногеномному SNP-генотипированию позволила перейти к точному картированию генетического разнообразия. Например, GGRS-анализ 1092 голштинских коров выявил 101 кандидатный регион отбора (256 генов), связанных с адаптацией к субтропикам, иммунитетом и репродукцией, а ROH-анализ подтвердил высокую разрешающую способность метода (Liu et al., 2021). В глобальном масштабе активно ведутся GWAS-исследования для выявления QTL, контролирующих накопление элементов. Интеграция маркер-ассоциированной и геномной оценки повышает точность прогноза племенной ценности по сложным полигенным признакам, включая устойчивость к экотоксикантам (Селионова и др., 2023). Внедрение ДНК-микроматриц (BovineSNP50 BeadChip) открыло возможности для одновременного анализа полиморфизма по целым геномам (Глазко, 2012), а подходы ландшафтной геномики позволили установить связь между генетической структурой пород и эколого-географическими условиями, подчеркнув важность сохранения гетерогенных местных пород (Глазко, 2012).

Квантитативно-генетические параметры элементного статуса подтверждают его селекционную ценность. У скота породы нелоре коэффициент наследуемости (h^2) уровня меди, цинка и железа варьирует от 0,29 до 0,36 (Tizioto et al., 2015; Afonso et al., 2019), а у ангусского скота наследуемость железа достигает 0,48 (Mateescu et al., 2013). В качестве генетических маркеров продолжительности продуктивной жизни идентифицированы полиморфные варианты гена DGAT1 (BTA14), а также SNP на 4-й, 5-й, 15-й и 19-й хромосомах, ассоциированные с репродуктивным долголетием (Бекенев, 2019). В молочном скотоводстве h^2 кальция и цинка в

молоке достигает 0,72 и 0,57 соответственно (Buitenhuis et al., 2015).

Перспективным направлением остается изучение полиморфизмов генов-кандидатов, контролирующих гормональный статус и обмен веществ. Так, для крупного рогатого скота симментальской и красной степной пород Казахстана охарактеризованы полиморфные варианты гена P1T-1, ассоциированные с продуктивными качествами, что открывает возможности для маркерной селекции (Джаксыбаева и др., 2023).

Отечественная генетическая школа активно интегрирует биохимические маркеры в селекцию. Фундаментальные работы Л.К. Эрнста, Н.А. Зиновьевой, А.В. Скального, С.А. Мирошникова, И.П. Шейко, А.Н. Фролова заложили теоретическую базу для понимания взаимосвязи полиморфизма генов-кандидатов с элементарным гомеостазом. Тем не менее, математическое обоснование наследуемости барьерно-накопительных функций у специфических локальных популяций в условиях биогеохимических провинций Западной Сибири остаётся фрагментарным.

Высокую диагностическую ценность панелей STR-маркеров демонстрируют современные исследования. М.Е. Михайлова с соавторами (2025) доказали, что анализ 12 высокополиморфных STR-локусов позволяет выявлять специфические «приватные» аллели, характеризующие генетическую структуру породы. Для практической реализации племенного учёта формируются специализированные генетические базы данных, например, «Микросателлитные профили быков-производителей черно-пёстрой и голштинской пород» (Волкова и др., 2024).

Геномные технологии позволяют выявлять генетические детерминанты сложных метаболических интерьерных параметров. GWAS, проведённый Игнатъевой и соавторами (2024) на коровах голштинской породы, выявил высокосignимые QTL на 1, 6, 7, 11, 15, 16 и 20 хромосомах, ассоциированные с концентрацией метаболитов молока. Гены-кандидаты (FNDC3B, GPX5, RUNX1, CDH12) сопряжены с фертильностью, устойчивостью к заболеваниям и качеством туши (Игнатьева и др., 2024).

Аналогичная парадигма применима для минеральных признаков: идентификация SNP, ассоциированных с содержанием Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd в тканях, позволит создать геномные индексы элементного статуса. Акцентируется необходимость интеграции полногеномных данных с фенотипическими показателями для создания эффективных селекционных программ (Нарожных, 2019). Метод геномного прогнозирования (GP) оценивает племенную ценность на основе SNP-маркеров без необходимости фенотипирования каждой особи. Коцаев и Аврахам (2025) продемонстрировали возможность повышения точности GP за счёт отбора информативных SNP-маркеров, поскольку стандартные селекционные индексы ориентированы преимущественно на продуктивные признаки и не всегда отражают адаптивные возможности (Басонов и др., 2024; Мурленков, Шендаков, 2025).

Включение микроэлементного статуса в комплексную оценку племенной ценности свиней повышает эффективность отбора по адаптивным качествам, что экстраполируется и на крупный рогатый скот с учётом специфики накопления элементов в различных биогеохимических провинциях (Назаренко, 2024). Интеграция биомаркерных технологий требует стандартизации методов, установления референсных значений и разработки регрессионных моделей. В отечественной практике научной школой В.Л. Петухова, О.С. Короткевич, Т.В. Коноваловой, К.Н. Нарожных получены патенты на способы определения содержания тяжёлых металлов по биопробам волоса и производным кожи (пат. № 2421726, 2602915, 2426119), а С.А. Мирошников с соавторами запатентовали способы отбора по элементному составу шерсти (пат. № 2607751, 2747469).

Созданы регрессионные модели для прогнозирования содержания свинца и кадмия в печени по их уровню в лёгких ($R^2 = 0,56$ и $0,44$) (Нарожных, 2019), а также модели прогнозирования содержания элементов в органах по их уровню в щетине свиней (Назаренко, 2024). Эти разработки создают методологическую основу для внедрения элементных маркеров в

селекционную практику.

Тяжёлые металлы и эссенциальные микроэлементы, рассматриваемые как интерьерные маркеры, обладают рядом преимуществ: высокая наследуемость ($h^2 = 0,27-0,72$), возможность определения в раннем возрасте, неинвазивность метода при использовании биопроб волоса, корреляция с важнейшими физиологическими функциями (Шейко, 2021; Зиновьева и др., 2019). Однако масштабная интеграция этих методов требует решения фундаментальных проблем. Во-первых, необходимо строго доказать, что фенотипическая изменчивость элементного статуса обусловлена генотипом, а не скрытыми факторами среды. Во-вторых, требуется количественная оценка влияния генотипа быков-производителей на биохимические признаки потомства. В-третьих, остаётся неизученным вопрос сопряжённости уровня накопления тяжёлых металлов с показателями генетического здоровья популяций, в частности с частотой соматической хромосомной нестабильности (Куликова, 1998; Кочнева, 2005).

Таким образом, современные достижения в области геномной селекции, молекулярной генетики и биоэлементологии создают научный задел для формирования нового направления — селекции на элементный статус, направленной на создание генотипов с оптимальным минеральным гомеостазом, высокой резистентностью к экотоксикантам и повышенной продуктивностью.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в Новосибирской и Кемеровской областях на бычках черно-пестрой, голштинской и герефордской пород (возраст 13-14 месяцев). Кормление и содержание животных осуществлялись в соответствии с зоотехническими нормами (Толанов, 1991; Драганов и др., 2011). Пробы отбирались у клинически здоровых животных.

Материалом для исследования послужили образцы мышц, печени, сердца, легких, почек, селезенки, цельной крови, сыворотки крови и волоса, полученные от тридцати бычков. Общее количество проб составило 330. За период исследования было выполнено более двух тысяч анализов, с применением зоотехнических, физико-химических, гематологических, биохимических, физиологических, цитогенетических и статистических методов. Схема исследований представлена на Рисунке 1.

Особое внимание было уделено изучению влияния генотипа быков-производителей голштинской породы ($n=34$) на устойчивость и предрасположенность потомства к аккумуляции меди в мышечной ткани, печени и почках.

Концентрации тяжелых металлов (кадмия, свинца, меди, марганца, цинка и железа) в образцах тканей и органов крупного рогатого скота черно-пестрой и голштинской пород определялись в сертифицированном аналитическом центре, функционирующем на базе Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН. Исследование волосяного покрова осуществлялось в сертифицированной аналитической лаборатории Института неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН. Анализ волос проводили по методике спектрального анализа, разработанной сотрудниками института (Комиссарова, Коновалова, Сапрыкина, 2015).

Анализ на кадмий и свинец проводился методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на аппарате SOLAAR, серии М6, в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30178-96, регламентирующего атомно-

абсорбционный метод определения токсичных элементов в сырье и пищевых продуктах.



Рисунок 1 – Схема исследований

Исследования других элементов выполняли на спектрофотометре Perkin-Elmer Zeeman /3030 методом ААС с использованием электротермической и пламенной атомизации.

Биохимические и гематологические исследования выполнялись в лаборатории ФГБОУ ВО Университет биотехнологий на анализаторе Photometer 5010.

Образцы кормовых растений, почвы и воды, отобранные на территории разведения бычков проанализированы на содержание тяжелых металлов по данным Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Narozhnykh et al., 2016; Syso et al., 2017; Narozhnykh et al., 2017a).

После убоя быков были отобраны образцы органов и тканей. Масса каждой пробы составляла до 100 г. Отобранные образцы делили на части, подвергали заморозке при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и хранили до момента проведения исследований.

Забор крови из яремной вены производился у животных перед убоем с соблюдением правил асептики и антисептики. Перед процедурой животные выдерживались на 14-часовой голодной диете. Кровь отбиралась в пробирки с 5%-м раствором цитрата натрия в качестве антикоагулянта.

Анализ макро- и микроэлементного состава проводился методами атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) на оборудовании SOLAAR M6 и iCAP 6500.

Для подготовки волоса к анализу применялась методика очистки, включающая многократное промывание бидистиллированной водой (до десяти раз) с использованием миксера на скорости 1 000 об/мин в течение 1 мин. для каждой промывки (Коваленок и др., 2012; Комиссаров и др., 2015; Мирошников и др., 2017в). После этого проводилась промывка ацетоном (2 мин.), удаление остатков ацетона деионизированной водой и высушивание при комнатной температуре.

К очищенной пробе добавляли 2 мл азотной кислоты (ОСЧ 27-5) и помещали в автоклав микроволновой печи MARS-5 (CEM) для растворения при постепенном повышении температуры до 180 °С в течение 40 мин. После охлаждения автоклава раствор переносили в мерную колбу, готовили калибровочные растворы на основе многоэлементных стандартов МЭС («Скат») для 10- и 100-кратного разбавления и проводили анализ на спектрометре iCAP 6500 (Thermo Scientific, США).

Подготовка образцов животного происхождения начиналась с помещения взвешенной навески в кварцевую чашку с добавлением 25-50 мл этилового спирта. Полученную смесь выдерживали в холоде в течение 12 ч., накрыв фильтровальной бумагой. Затем пробу подсушивали при небольшом нагреве, охлаждали и постепенно добавляли раствор азотной кислоты (HNO₃) в соотношении 1 : 1, инициируя процесс окисления.

После реакции с азотной кислотой образцы нагревали до обугливания на плите. Затем чашки с подготовленными образцами помещали в

муфельную печь, предварительно нагретую до 250 °С, и медленно повышали температуру до 510 °С. При этой температуре пробы выдерживались в течение 4 ч. для процесса озоления.

После озоления добавляли 5 мл концентрированной азотной кислоты и 1 мл хлорной кислоты, накрывали чашки крышками и нагревали до просветления раствора. Затем пробы упаривали досуха, а сухой остаток обрабатывали 5 мл раствора соляной кислоты (1 : 1) и упаривали до влажных солей. Полученные соли растворяли в 10 мл 2,5%-го раствора соляной кислоты, что завершало процесс подготовки проб.

В рамках гематологических исследований проводился подсчет числа эритроцитов и лейкоцитов в камере Горяева, а также определение СОЭ по методу Панченкова. Измерение уровня гемоглобина проводилось фотометрически (540 нм) гемихромным методом (набор «ГЕМОГЛОБИН-НОВО», «Вектор-Бест»).

Биохимический анализ сыворотки крови проводили на автоматическом анализаторе Photometer 5010 (ROBERT RIELE GmbH & CoKG, Германия) с использованием стандартных наборов реагентов («Вектор-Бест»).

Определение концентрации общего белка в крови осуществлялось биуретовым методом с применением реагентов «Протеин-НОВО».

Содержание глюкозы в сыворотке определялось глюкозооксидазным методом с применением набора реагентов «НОВОГЛЮК» «Вектор-Бест». В ходе окисления глюкозы кислородом при участии глюкозооксидазы образуется перекись водорода. Образующаяся в результате реакции перекись водорода используется для окисления 4-аминоантипирина под действием пероксидазы в присутствии фенола, что приводит к формированию окрашенного соединения, которое измеряется фотометрически.

Определение содержания мочевины в образцах сыворотки крови проводилось посредством ферментативного анализа, основанного на применении уреазы. В качестве реагентов использовался комплект «НОВОКАРБ» от «Вектор-Бест». В основе метода лежит гидролиз мочевины

под воздействием уреазы с образованием диоксида углерода и аммиака. Последний, вступая во взаимодействие с салицилатом натрия и гипохлоритом натрия (в присутствии нитропруссид натрия), формирует окрашенный комплекс. Фотометрическая оценка интенсивности окраски при 640 нм позволила установить концентрацию мочевины.

Ферментативный метод с использованием реактивов «НОВОХОЛ» («Вектор-Бест») был выбран для определения уровня общего холестерина в сыворотке. Межпородные различия показателей холестеринového профиля у крупного рогатого скота в Западной Сибири были подробно охарактеризованы нами ранее (Себежко и др., 2023б). В основе метода лежит каскад ферментативных реакций, включающих холестеринэстеразу, холестериноксидазу и пероксидазу, приводящий к образованию окрашенного продукта, абсорбирующего свет с пиком при 500 нм. Интенсивность окраски была использована как показатель концентрации холестерина.

Концентрации общего и прямого билирубина определяли, используя методику Йендрашека-Грофа с набором реагентов «БИЛИРУБИН-НОВО» («Вектор-Бест»). Метод основан на реакции диазотирования билирубина диазосульфаниловой кислотой. Кофеин-бензоат натрия, являющийся ускорителем, добавлялся для определения общего билирубина, в то время как прямой билирубин определялся без него. Образующийся азокраситель определялся колориметрически при длине волны 546 нм.

Для определения активности АЛТ в сыворотке крови использовался метод Райтмана-Френкеля, основанный на реакции с 2,4-динитрофенилгидразином, с применением реактивов «ТРАНСАМИНАЗА-АЛТ-НОВО» («Вектор-Бест»). Принцип метода заключается в измерении оптической плотности продукта реакции - 2,4-динитрофенилгидразона L-глутаминовой и пировиноградной кислот при 490 нм. Эти кислоты образуются при переаминировании L-аланина и α -кетоглутарата под влиянием АЛТ. В щелочной среде образовавшийся гидразон окрашивает

раствор в красно-коричневый цвет, интенсивность которого пропорциональна активности фермента.

Оценка активности аспаратаминотрансферазы (АСТ) в сыворотке осуществлялась методом, аналогичным применяемому для определения АЛТ. В основе метода лежит измерение концентрации 2,4-динитрофенилгидразона пировиноградной кислоты, образующегося в результате реакции переаминирования между L-аспаратом и α -кетоглутаратом, катализируемой АСТ. Спектрофотометрическое измерение проводилось при длине волны 490 нм. В работе использовались реактивы «ТРАНСАМИНАЗА-АСТ-НОВО» («Вектор-Бест»).

Цитогенетический анализ проводился на лимфоцитах периферической крови, подвергнутых стимуляции фитогемагглютинином. Культивирование клеток выполнялось в соответствии с методом Р. Moorhead и соавторов (1960) с учетом поправок, внесенных М. Л. Кочневой (2005). Для визуализации хромосом применялись методы окрашивания, предложенные М. Seabright и Р. Perry (Perry, Wolff, 1974). В ходе анализа выявлялись анеуплоидии, полиплоидии, фрагментации хромосом, межхромосомные обмены и другие хромосомные мутации. Оценка цитогенетического гомеостаза включала определение уровня диплоидии и рассчитывалась с использованием интегральных показателей, отражающих пропорции различных типов мутаций по отношению к диплоидии.

Полученные данные были подвергнуты статистической обработке с использованием языка R (версия 4.5.3) (Васильева, 2007; Камалдинов и др., 2016; McDonald, 2014).

Для описания рассеяния данных вычисляли стандартное отклонение (σ), коэффициент вариации и межквартильный размах (IQR), определяемый как интервал, охватывающий средние 50 % значений ($Q_3 - Q_1$). В случаях распределения, отличного от нормального, расчет средней арифметической и дисперсии осуществляли по методу S. P. Hozo с соавторами (Hozo et al.,

2005) по формулам:

$$\bar{x} \approx \frac{a + 2m + b}{4} + \frac{a - 2m + b}{4n}; \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \left(a^2 + m^2 + b^2 + \left(\frac{n-3}{2} \right) \frac{(a+m)^2 + (m+b)^2}{4} - n \left(\frac{a+2m+b}{4} + \frac{a-2m+b}{4n} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где n – размер выборки; a – минимальное значение признака; b – максимальное значение признака; m – медиана; $\bar{x}$ – средняя арифметическая; σ^2 – варианса.

Соответствие эмпирических распределений нормальному закону проверяли с помощью критерия Шапиро-Уилка (W) и критерия Колмогорова-Смирнова. При нормальном распределении для оценки достоверности различий применяли t -критерий Стьюдента. При отклонении распределения данных от нормального закона (критерий Шапиро–Уилка) использовали непараметрические критерии Манна–Уитни, Вилкоксона и Крускала–Уоллиса с апостериорным тестом Данна с коррекцией Холма.

Долю влияния организованных факторов на изучаемые признаки оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с вычислением показателя силы влияния фактора (r_w). Факториальную изменчивость и уровень влияния различных органов на степень аккумуляции элементов определяли с помощью критерия Краскела-Уоллиса (H) (Васильева, 2007; Камалдинов и др., 2016) по формуле:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1), \quad (3)$$

где C – количество градаций признака; n_i – количество наблюдений в i -й градации; $N = \sum n_i$ – общее количество изучаемых вариантов во всех градациях; R_i – сумма рангов в i -й градации.

Сопряженность признаков оценивалась с использованием коэффициента корреляции Пирсона (r), а при отсутствии нормального

распределения — рангового коэффициента корреляции Спирмена (r_s) по формуле:

$$r_s = 1 - \frac{6 \times (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots d_l^2)}{n^3 - n}, \quad (4)$$

где n — число сравниваемых пар (Камалдинов и др., 2016; Гржибовский и др., 2017).

Степень аккумуляции химических элементов оценивалась с использованием интегрированного коэффициента R_i (Дегтярев, 2024), рассчитанного по формуле: $R_i = 1 - (\sum R / (m \times n))$, где: $\sum R$ обозначает суммарное значение рангов анализируемых признаков; m — соответствует числу ранжируемых признаков; n — отражает объем выборки.

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

Для корректной оценки элементного статуса сельскохозяйственных животных в качестве интерьерного маркера племенной ценности необходимо строго элиминировать влияние факторов внешней среды. В связи с этим, содержание макро- и микроэлементов в почвенном покрове и растительности на территориях природных и антропогенных сенокосов, пастбищ и пахотных угодий, расположенных в разных климатических областях Сибири, было исследовано посредством периодического мониторинга с 2010 по 2022 гг. (Сысо и др., 2014; Syso et al., 2017; Сысо и др., 2017a; Petukhov et al., 2016a, 2016c; Narozhnykh, Konovalova et al., 2016; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017b; Narozhnykh, Konovalova et al., 2018). Забор образцов растительного материала производился в период цветения либо молочной зрелости зерновых культур, а также в начале уборочной кампании.

Биогеохимический мониторинг проводился в хозяйствах Новосибирской области, где формировались и содержались подопытные животные. Данные о содержании тяжелых металлов в почвах, кормах (грубых и концентрированных) и воде были получены в Институте почвоведения и агрохимии СО РАН и частично представлены в научных публикациях, подготовленных совместно с К. Н. Нарожных, А. И. Сысо и другими авторами (Petukhov et al., 2016a, 2016c; Syso et al., 2017; Сысо и др., 2017a; Narozhnykh, Konovalova et al., 2016; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017b; Narozhnykh, Konovalova et al., 2018).

Установлено, что анализ кормовых трав в сельскохозяйственных районах Новосибирской области не выявил значительного превышения регламентированных российскими нормативами максимально допустимых уровней (МДУ) тяжелых металлов, а также предельно допустимых

концентраций (ПДК), установленных международными стандартами (Таблица 1). Данный факт имеет принципиальное значение для селекции: отсутствие токсической нагрузки в рационе позволяет рассматривать аккумуляцию элементов в тканях животных не как следствие экологического стресса, а как реализацию их генетического потенциала по минеральному обмену.

По данным В. Б. Ильина (2012), Ю. В. Кравцова и А. И. Сысо (2014), А. И. Сысо (2007, 2017а, 2017б), Syso et al. (2017) и других ученых, техногенное воздействие, приводящее к загрязнению тяжелыми металлами почв и кормов, в Западной Сибири и, в частности, в Новосибирской области, практически не выражено (Ильин, Сысо, 2001; Ильин, 2012; Petukhov et al., 2016а, 2016с; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017б; Narozhnykh, Konovalova et al., 2018). В различных кормах не зафиксировано присутствия радиоактивного загрязнения цезием-137 и стронцием-90, что подтверждается данными радиологического контроля кормовой базы (Короткевич и др., 2014; Sebezshko et al., 2017d). Стабильный радиационный и химический фон создает оптимальные условия для проявления аддитивных генетических эффектов и изучения наследуемости барьерно-накопительных функций.

Таблица 1 - Содержание (в мг/кг абсолютно сухого вещества) химических элементов в грубых кормах в Западной Сибири*

Элемент	Сено из злаковых трав	Сено бобовых трав	Сенаж	ПДК**
Cd	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,3
Cu	8,0 ± 1,0	9,0 ± 2,0	4,0 ± 1,0	30,0
Fe	49,0 ± 5,0	84,0 ± 15,0	86,0 ± 12,0	—
Mn	20,0 ± 5,0	25,0 ± 8,0	54,0 ± 11,0	—
Pb	0,8 ± 0,2	1,5 ± 0,3	0,8 ± 0,1	5,0
Zn	17,0 ± 3,0	27,0 ± 4,0	24 ± 6,0	50,0

Примечание

1* По данным совместных исследований (Petukhov et al., 2016а, 2016с; Syso et al., 2017; Сысо и др., 2017а; Narozhnykh, Konovalova et al., 2016; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017б; Narozhnykh, Konovalova et al., 2018).

2** Технические условия. Сенаж. ОСТ 10 201-97

Анализ межвидовых различий в растительном сырье показал, что концентрации железа (Fe), свинца (Pb) и цинка (Zn) в сене, заготовленном из злаковых трав, оказались ниже, чем в сене на основе бобовых культур. Аналогичные закономерности распределения макро- и микроэлементов в почвах и кормовых травах были выявлены и в прифермерских полях Барнаульского приобья (Сысо и др., 2017а). Сбалансированность минерального профиля рационов исключает алиментарный дефицит или избыток, что позволяет в дальнейшем коррелировать тканевую концентрацию элементов исключительно с генотипическими особенностями животных.

Для оценки влияния региональных биогеохимических особенностей на фенотипическую изменчивость интерьерных признаков был проведен анализ содержания тяжелых металлов в почвах, грубых кормах и зерновых культурах, произрастающих в Новосибирской области и Кузбассе. Например, уровень кадмия (Cd) в почве, грубых кормах и зерне Новосибирской области составил соответственно $0,20 \pm 0,06$; $0,10 \pm 0,03$ и $0,015 \pm 0,005$ мг/кг, что не превышает максимально допустимый уровень (МДУ) в 0,3 мг/кг.

Исследования, аналогичные проведенным в Новосибирской области, также были выполнены в Кузбассе с целью определения концентрации тяжелых металлов в почвах и кормах (Syso et al., 2017; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017b). Согласно данным, предоставленным Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН, в Кузбассе не зафиксировано превышения максимально допустимых концентраций (МДК) тяжелых металлов в почве, зерне и грубых кормах (ГН 2.1.7. 2511–09; ГОСТ 17.4.4.02–84). При этом концентрации тяжелых металлов в сене и злаковых культурах Новосибирской области и Кузбасса были сопоставимы и находились в пределах допустимых значений, установленных для кормов (СанПиН 2.3.2.1078-01; Сысо, 2016б). Подобная картина наблюдалась и в отношении концентраций тяжелых металлов в почве (ГОСТ 17.4.4.02–84).

Установлено статистически значимое ($P < 0,05$) различие в содержании кадмия в зерновых культурах, выращенных в Кузбассе и Новосибирской области. Концентрация кадмия в зерне из Кузбасса (0,171 мг/кг) была выше, чем в зерне из Новосибирской области (0,015 мг/кг). Несмотря на это, ни в одном из регионов не было зафиксировано превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) кадмия, составляющей 0,5 мг/кг. Важно подчеркнуть, что выявленные межрегиональные колебания остаются в зоне физиологической нормы и не индуцируют патологических сдвигов в метаболизме, что валидирует использование данных популяций в качестве моделей для изучения генетики минерального обмена.

В отдельных районах Кузбасса было зафиксировано большее содержание тяжелых металлов, чем в Новосибирской области. При этом в районах, где развито животноводство (крупный рогатый скот), в обеих областях Западной Сибири концентрации тяжелых металлов в почве и кормовых культурах не превышали установленных максимально допустимых уровней (МДУ) (ТР ТС 021/2011; ГОСТ 17.4.3.06–86). Отсутствие выраженного техногенного и радиационного загрязнения подтверждается данными регионального экологического мониторинга (Рождественская и др., 2019; Попова, Наквасина, 2015).

На основании гигиенической, агрохимической и биогеохимической оценки можно сделать вывод, что исследованные почвы в сельскохозяйственных зонах Сибири позволяют обеспечить экологическую безопасность растительных кормов (Сысо, 2016а; Syso et al., 2016, 2017; Syso, Narozhnykh, Konovalova, 2016; Незавитин и др., 2000). Таким образом, установленный стабильный биогеохимический фон является фундаментальным условием, позволяющим трактовать вариацию содержания тяжелых металлов и эссенциальных элементов в органах и тканях подопытного скота как проявление генетического разнообразия. Это создает надежную базу для последующего анализа наследуемости данных интерьерных признаков, оценки влияния генотипа быков-производителей и

разработки методов прижизненной селекции на оптимизацию минерального гомеостаза.

Результаты, представленные в разделе 3.1, получены при личном участии диссертанта и опубликованы в совместных работах (Petukhov et al., 2016a, 2016c; Syso et al., 2017; Сысо и др., 2017a; Narozhnykh, Konovalova et al., 2016; Narozhnykh, Konovalova et al., 2017b; Narozhnykh, Konovalova et al., 2018).

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

3.2.1. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в мышечной ткани как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Мышечная ткань выступает не только как основной компонент мясной продукции, но и как важнейшее депо, интегрально отражающее генетически детерминированные особенности минерального обмена и барьерно-накопительную функцию организма животного. Около 60% мякоти в туше составляют мышцы, которые состоят из мышечного брюшка и сухожилия. Мышечное брюшко имеет паренхиму, состоящую из мышечных клеток-волокон, соединенных рыхлой соединительной тканью (строма) в пучки первого порядка, затем второго порядка и так до образования мышцы (Короткевич и др., 2026). Именно на уровне этих структурных элементов реализуется тканеспецифичная аккумуляция макро- и микроэлементов, что делает химический состав мяса сложным полигенным интерьерным признаком.

В современной селекции сельскохозяйственных животных изучение элементного статуса мышечной ткани имеет фундаментальное значение, поскольку позволяет оценить способность генотипа к поддержанию минерального гомеостаза и выявить скрытое генетическое разнообразие

популяций. Фундаментальные основы зависимости мясной продуктивности и качества туш от зоотехнических и генетических факторов были заложены еще в классических руководствах по разведению сельскохозяйственных животных (Красота и др., 2006). Минеральный состав мышечной ткани в значительной степени определяется не только типом кормления, но и породной принадлежностью: при экстенсивном рационе на основе грубых кормов отмечено более высокое содержание фосфора и железа, тогда как интенсивное откармливание способствовало накоплению натрия и меди, причем влияние генотипа породы проявлялось преимущественно в различиях по содержанию кальция и натрия (Hollo et al., 2007).

Способность к депонированию химических элементов в мышцах является наследуемым признаком, вариация которого служит индикатором адаптивного потенциала и племенной ценности животных. Необходимость отслеживать концентрации тяжелых металлов и эссенциальных элементов в мышечной ткани у различных пород крупного рогатого скота в контексте оценки их генетического разнообразия отмечена во многих научных публикациях (Петухов, 2012; Cabrera et al., 2010; Garcia-Vaquero et al., 2007; Ramos et al., 2012).

Живая масса и породная принадлежность у быков породы герефорд и брафорд в возрасте 16-18 месяцев достигает 460 кг (Линник, Заяц, 2014; Грикшас и др., 2016; Нарожных, 2019; Cabrera et al., 2010; Ramos et al., 2012), в редких случаях – 570 кг (Гамарник и др., 2012), у венгерской серой породы и голштино-фризской – 450-550 кг (Hollo et al., 2007), лимузин, рыжий ангус или салерс – более 650 кг, а у черно-пестрой – около 450 кг (Желтиков и др., 2010; Горелик и др., 2014; Донник и др., 2015; Раджабов и др., 2020). Различия в темпах роста и физиологическом созревании, генетически закрепленные у разных пород, напрямую влияют на интенсивность метаболизма и, как следствие, на профиль накопления элементов в мышечной ткани. Возрастные изменения минерального состава мышечной ткани отражают этапы онтогенетического развития и дифференциацию

фенотипа, что необходимо учитывать при стандартизации условий сравнительных исследований (Короткевич и др., 2026).

Результаты анализа уровней тяжелых металлов, представленные в Таблице 2, были сопоставлены с допустимыми значениями, установленными в санитарных правилах и нормах СанПиН 2.3.2.1078-01, действовавших на момент проведения основной части исследований. Современные требования к безопасности мясной продукции дополнительно регламентированы Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 034/2013. Важно подчеркнуть, что отсутствие токсической нагрузки (концентрации ниже ПДК) является методологическим условием, позволяющим трактовать выявленную вариабельность элементов исключительно как проявление генетического разнообразия, а не как следствие экологического стресса.

Таблица 2 - Содержание и изменчивость тяжелых металлов в мышцах крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$	ПДК*
Cd	31	0,015 $\pm$ 0,001	0,013	0,006	0,005	0,013-0,017	0,05
Pb	14	0,070 $\pm$ 0,013	0,049	0,049	0,042	0,042-0,098	0,50

Примечание - * СанПиН 2.3.2.1078-01.

Анализ концентрации тяжелых металлов в мышечной ткани показал статистически значимое ($p < 0,001$) превышение концентрации свинца над концентрацией кадмия в 4,8 раза. Для целей селекции особый интерес представляет высокая фенотипическая изменчивость, характерная для обоих элементов. Разброс данных по свинцу был выражен сильнее, чем по кадмию: коэффициент вариации Pb в 1,7 раза превышал аналогичный показатель для Cd (69,9% и 40,0% соответственно). Столь широкий диапазон индивидуальной изменчивости (от 0,005 до 0,15 мг/кг для Pb и от 0,004 до 0,025 мг/кг для Cd) в условиях идентичного кормления и содержания является доказательством наличия значительной средовой и генетической дисперсии по признакам барьерно-накопительной функции. Это создает

надежную базу для направленного отбора животных с низкой склонностью к гиперкумуляции токсикантов. Вместе с тем, средние уровни Cd и Pb не превышали установленных нормативов, находясь ниже ПДК в 3,4 и 7,2 раза соответственно. При этом уже есть способы для осуществления прижизненного контроля и мониторинга накопления кадмия в мышечной ткани без убоя животных (Нарожных и др., 2021), что критически важно для массового скрининга племенного поголовья.

Таблица 3 отражает содержание важнейших для организма эссенциальных микроэлементов. Цинк и железо, необходимые для множества биохимических процессов, обнаружены в значительно больших концентрациях (52,99 и 50,88 соответственно), чем медь (1,57) и марганец (0,42), также играющие важную роль в ферментативных системах мышечной ткани.

Таблица 3 - Содержание и изменчивость эссенциальных металлов в мышцах крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Cu	31	$1,57 \pm 0,06$	1,50	0,33	0,30	1,45-1,69
Fe	31	$50,88 \pm 2,61$	49,50	14,56	24,10	45,54-56,22
Mn	31	$0,42 \pm 0,03$	0,40	0,15	0,27	0,36-0,48
Zn	31	$52,99 \pm 1,24$	52,82	6,91	5,77	50,46-55,52

Примечание - Предельно допустимые уровни эссенциальных элементов (Cu, Fe, Mn, Zn) в мясе ТР ТС 034/2013 и СанПиН 2.3.2.1078-01 не регламентированы.

Разброс значений концентраций микроэлементов в мышечной ткани, измеренный коэффициентом вариации, был относительно небольшим и колебался в пределах 13,0-35,8%. Эта вариабельность значительно уступала той, что наблюдалась для кадмия и свинца. Сниженная фенотипическая изменчивость эссенциальных элементов (особенно цинка и меди) косвенно указывает на более жесткий генетический контроль их гомеостаза на уровне мышечной ткани, что согласуется с данными о высокой наследуемости (h^2) данных признаков у крупного рогатого скота. Концентрации эссенциальных

элементов находились в пределах физиологически обоснованных значений, характерных для мышечной ткани крупного рогатого скота. Детальную информацию о границах возможных значений концентрации химических элементов в мышечной ткани можно найти в Таблице 3, где приведены соответствующие доверительные интервалы.

Ранжированный ряд по содержанию эссенциальных элементов в мышечной ткани выглядит как $Zn > Fe > Cu > Mn$ в соотношении 126 : 121 : 4 : 1. Установленный профиль свидетельствует о видоспецифичных генетических механизмах регуляции минерального обмена у крупного рогатого скота (*Bos taurus*).

Красное мясо признается важным источником минеральных веществ (Cabrera et al., 2010; Litwińczuk et al., 2015; Pereira et al., 2018), особенно железа и цинка (Cabrera et al., 2010). Вероятно, именно генетической детерминацией синтеза миоглобина и гемоглобина обусловлена их высокая концентрация в исследованных образцах. Среднее содержание железа в мясе составило 50,88 мг/кг ($P < 0,01$), что вполне объяснимо, учитывая, что железо в мышцах присутствует в легкоусвояемой форме гема, связанного с белками миоглобином и гемоглобином (Короткевич и др., 2026). Важно подчеркнуть высокую биодоступность микроэлементов из мяса: для железа она составляет 60-70 %, для марганца – от 55 до 95 %, для меди – 30-45 %, а для цинка – 40-68 % (Ramos et al., 2012; Cabrera et al., 2010), что повышает селекционную ценность животных с оптимальным элементным статусом.

Наши данные о межпородных различиях согласуются с результатами зарубежных исследователей, которые установили, что концентрации меди, железа, марганца, селена и цинка в мышечной ткани достоверно выше у телят молочного направления (голштинская порода), чем у телят мясного направления (галисийская порода) (Pereira et al., 2018). Подобная дифференциация подтверждает, что элементный статус мышечной ткани является надежным биомаркером, позволяющим объективизировать генетические различия между породами разного направления

продуктивности. Аналогичные межпородные различия по уровню эссенциальных элементов и качеству продукции отмечены и для пород крупного рогатого скота, районированных в условиях Сибири (Солошенко и др., 2025). При сравнении польских аборигенных пород (красной, белоспинной и черно-пестрой) с голштинской и симментальской породами были выявлены достоверные различия в содержании магния, кальция, цинка и марганца в мышечной ткани, причем голштинский скот характеризовался наименьшими концентрациями Mg и Ca, что неопровержимо подтверждает существование генетически обусловленных особенностей минерального обмена у скота разного направления продуктивности (Litwińczuk et al., 2015).

Важным аспектом современной селекции является изучение связи между генетическим потенциалом, эффективностью использования корма и химическим составом мяса на внутripородном уровне. Современные исследования бычков абердин-ангусской породы ($n = 212$) с использованием автоматизированных систем контроля (GrowSafe) выявили влияние показателя остаточного потребления корма (RFI) на минеральный состав мышечной ткани. Установлено, что среднее содержание кальция и магния в мясе достоверно варьировало в зависимости от групп животных, сформированных по эффективности конверсии корма и среднесуточному приросту, что свидетельствует о генетической детерминации не только макроэлементного, но и общего минерального статуса (Сермягин и др., 2023).

Таким образом, в результате исследования были определены средние значения и параметры фенотипической изменчивости содержания тяжелых металлов и эссенциальных элементов в мышцах черно-пестрого скота, районированного в Западной Сибири. Полученные данные имеют значение не для токсикологического контроля, а для углубления понимания генетической архитектуры минерального обмена. Установлено, что фенотипическая изменчивость концентрации кадмия и свинца была значительно выше, чем у эссенциальных элементов, что обосновывает

возможность целенаправленной селекции на оптимизацию барьерно-накопительных функций. Важно отметить, что концентрация тяжелых металлов в мышечной ткани не превышала установленных предельно допустимых значений даже по более жестким нормативам ТР ТС 034/2013, что подтверждает экологическую безопасность генофонда и открывает перспективы для использования выявленных интерьерных маркеров в селекционно-племенной работе для повышения адаптивности и продуктивности животных.

3.2.2. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в миокарде как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Миокард выступает не только как ключевой орган гемодинамики, но и как высокоспецифичное метаболическое депо, интегрально отражающее генетически детерминированные механизмы тканеспецифичного депонирования химических элементов. Для нормального функционирования сердечной мышцы, обеспечения циклических сокращений и поддержания клеточного гомеостаза, необходимы микроэлементы и питательные вещества (Rosenblum et al., 2020). Именно на уровне кардиомиоцитов реализуется сложная система транспортёров и металлосвязывающих белков, делающая химический состав миокарда важным интерьерным маркером адаптивного потенциала животного.

Исследование микроэлементного состава миокарда бычков чернопестрой породы показало, что содержание свинца в миокарде составляет 0,83 мг/кг, что соответствует допустимым нормативам (ПДК 2,0 мг/кг), концентрация кадмия также находится в пределах установленных значений (Таблица 4). Важно подчеркнуть, что отсутствие токсической нагрузки позволяет трактовать выявленную вариабельность элементов исключительно как проявление генетического разнообразия популяции по признакам барьерно-накопительной функции.

Анализ соотношения токсикантов выявил, что свинец в миокарде аккумулирован в 383 раза больше, чем кадмий, причем концентрация кадмия в 115 раз ниже значений ПДК.

Таблица 4 - Содержание и изменчивость кадмия и свинца в сердце крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$	ПДК*
Cd	31	0,0022 ± 0,0002	0,002	0,0010	0,0011	0,0018-0,0025	0,25
Pb	30	0,8300 ± 0,1000	0,640	0,5700	0,5875	0,6200-1,0500	2,0

Примечание - * СанПиН 2.3.2.1078-01

Для целей селекции фундаментальное значение имеет высокая фенотипическая изменчивость уровней Cd и Pb (коэффициент вариации составил 45,2% и 69,0% соответственно). Столь широкий диапазон индивидуальной изменчивости в условиях идентичного кормления является убедительным доказательством наличия меньшей генетической дисперсии. Это создает надежную базу для направленного отбора животных с генетически обусловленной устойчивостью к гиперкумуляции экотоксикантов в жизненно важных органах.

Повышенная концентрация свинца в миокарде объясняется генетически закрепленной физиологической спецификой органа: сердце является высокоперфузируемой тканью с интенсивным капиллярным кровоснабжением, что способствует селективной аккумуляции циркулирующих в крови экотоксикантов. Данный феномен согласуется с данными Andjelkovic et al. (2019), где сообщается о склонности свинца к накоплению в органах с высоким кровоснабжением и активной метаболической функцией, что подтверждает роль миокарда как специфического органа-депо, чувствительного к оценке генотипа.

В отличие от экотоксикантов, фенотипическая изменчивость аккумуляции эссенциальных элементов в миокарде была существенно ниже (Таблица 5), что свидетельствует о жестком генетическом контроле их

гомеостаза.

Таблица 5 - Содержание и изменчивость эссенциальных металлов в сердце крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Zn	31	$20,65 \pm 0,52$	20,00	2,89	4,000	19,58-21,71
Mn	31	$0,51 \pm 0,02$	0,49	0,12	0,165	0,47-0,55
Cu	30	$4,55 \pm 0,08$	4,54	0,45	0,760	4,39-4,72
Fe	28	$72,07 \pm 1,82$	70,00	9,62	13,000	68,34-75,80

Показано, что концентрация железа в 3,5 и 15,8 раза ($P < 0,01$) превышает уровень цинка и меди. Особое внимание уделяется концентрации цинка, поскольку он генетически опосредованно влияет на сердечно-сосудистую систему через модуляцию окислительных процессов (Rosenblum et al., 2020).

Ранжированный ряд имеет следующий вид: железо > цинк > медь > марганец в соотношении: 141,0 : 40,4 : 8,9 : 1,0. Ранжированный ряд эссенциальных элементов в миокарде сохраняет видоспецифичную архитектуру, идентичную таковой в мышечной ткани, но с иным количественным соотношением, что подтверждает наличие общих, но тканеспецифично модулируемых генетических путей регуляции минерального обмена.

Фенотипическая изменчивость эссенциальных элементов была статистически значимо ниже, чем в мышечной ткани (Cv составил: для Zn – 14,0 %; Mn – 23,2 %; Cu – 9,8 %; Fe – 13,3 %). Сниженная вариабельность (особенно по меди и железу) косвенно указывает на более жесткий аллельный контроль их внутриклеточного гомеостаза на уровне кардиомиоцитов.

Фундаментальное значение для понимания генетической архитектуры данного интерьерного признака имеет молекулярный механизм регуляции. Клетки сердечной ткани — кардиомиоциты восприимчивы к накоплению железа (Ghafourian et al., 2020), причем регуляция железного гомеостаза в

миокарде осуществляется на клеточном уровне пептидным гормоном гепсидином, экспрессируемым непосредственно кардиомиоцитами. Экспериментальные исследования на мышах с кардиоспецифичным нокаутом гена гепсидина продемонстрировали развитие быстрой дилатационной кардиомиопатии, обусловленной избыточным накоплением железа в сердечной мышце, при сохранении нормального системного уровня железа (Lakhal-Littleton et al., 2016). Следовательно, полиморфизм генов, контролирующих синтез гепсидина и металлотионеинов, может рассматриваться как потенциальный генетический маркер для маркер-ассоциированной селекции (MAS) на устойчивость к кардиотоксическому стрессу и оптимизацию минерального статуса.

Аналогичным образом, цинк воздействует на кардиомиоциты через модуляцию окислительного стресса (Rosenblum et al., 2020). Генетически детерминированная эффективность цинк-зависимых антиоксидантных ферментов определяет индивидуальную резистентность животного к окислительному повреждению мембран.

Таким образом, определены средние уровни и параметры фенотипической изменчивости тяжелых металлов и эссенциальных элементов в миокарде быков. Установлено, что вариабельность накопления экотоксикантов в сердце значительно превышает таковую для эссенциальных нутриентов, что объективизирует различную степень генетического контроля над депонированием ксенобиотиков и физиологически важных ионов. Содержание Cu и Fe в сердце было соответственно в 2,9 и 1,4 раза выше, чем в мышцах, а уровень Zn - в 2,6 раза ниже. Полученные данные о повышенном содержании свинца в миокарде имеют генетическое и физиологическое обоснование, что исключает вероятность аналитической ошибки и позволяет рассматривать элементный профиль миокарда не просто как маркер биогеохимической нагрузки, а как сложный полигенный интерьерный признак, пригодный для использования в качестве критерия отбора при формировании генотипов с оптимальной адаптивностью и резистентностью.

3.2.3. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в печени как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Печень выступает не только как ключевой орган метаболизма (Северин, 2006; Васильева, Конопатов, 2017), но и как главное генетически детерминированное депо макро- и микроэлементов (Лелевич, 2009; Титов, 2017). Способность гепатоцитов к селективной аккумуляции и удержанию химических элементов находится под строгим полигенным контролем и является важнейшим интерьерным признаком, отражающим адаптивный потенциал, интенсивность пластического обмена и породную принадлежность животного (Коневалова и др., 2017).

В контексте селекционно-генетического мониторинга анализ накопления токсичных элементов в гепатобилиарной системе позволяет оценить эффективность барьерных механизмов организма. Приоритетное внимание уделялось элементам 1-го класса опасности - кадмию и свинцу, содержание которых регламентируется СанПиН 2.3.2.1078-01. Важно подчеркнуть, что в условиях отсутствия выраженного токсического пресса (концентрации ниже ПДК), выявленная вариабельность данных элементов служит индикатором скрытого генетического разнообразия популяции по признакам детоксикации.

В Таблице 6 представлены концентрации кадмия и свинца в печени бычков черно-пестрой породы. Концентрация кадмия всегда ниже концентрации свинца (Давыдова, Тагасов, 2002; Коновалова, 2016б). Разность значений в печени между Cd и Pb составила 0,38 мг/кг, т. е. уровень свинца в 20 раз превышает показатели кадмия. Выявленные межвидовые различия подтверждают существование видо- и породоспецифичных генетических механизмов регуляции минерального обмена. Так, уровень кадмия у свиней СМ-1 в печени был выше в 9 раз (Желтикова, 2007) в сравнении с нашими данными по герефордской породе крупного рогатого

скота (Нарожных и др., 2012а). Наши данные по аккумуляции свинца и кадмия в печени черно-пестрой и герефордской пород имеют приблизительно одинаковые значения (Нарожных, 2012б; Нарожных и др., 2015; Нарожных, 2019), что свидетельствует о консервативности данных признаков внутри вида *Bos taurus* при схожих условиях кормления. Концентрация Cd в печени у коров из региона Воеводина (Северная Сербия) колебалась от 0,033 до 0,151 мг·кг⁻¹ влажного веса (Tomović et al., 2017).

Таблица 6 - Содержание и изменчивость тяжелых металлов в печени крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$	ПДК*
Cd	15	0,02 ± 0,00	0,016	0,007	0,0095	0,016-0,024	0,25
Pb	30	0,40 ± 0,05	0,270	0,263	0,3260	0,302-0,498	2,0

Примечание - * СанПиН 2.3.2.1078-01

Для целей селекции фундаментальное значение имеет тот факт, что в печени, мышцах и сердце фенотипическая изменчивость уровней Cd и Pb была сопоставимо высокой. Столь широкий диапазон индивидуальной изменчивости в условиях стандартизированного содержания является убедительным доказательством наличия аддитивной генетической дисперсии. Это создает надежную базу для выбора направленного отбора животных с генетически обусловленной устойчивостью к гиперкумуляции экотоксикантов в паренхиматозных органах.

Наряду с токсикантами, важнейшим объектом селекционной оценки выступает содержание эссенциальных микроэлементов, интенсивность депонирования которых в печени жестко контролируется аллельным полиморфизмом транспортных белков (трансферрина, ферритина, церулоплазмينا) и металлотионеинов.

Так, высокий уровень железа в печени (68,29 мг/кг) объясняется генетически обусловленной способностью гепатоцитов к его накоплению с помощью транспортных белков – трансферрина и ферритина и уровня гормона гепсидина (Георгиевский и др., 1979; Северин, 2006).

Таблица 7 - Содержание и изменчивость эссенциальных металлов в печени крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Cu	27	$8,99 \pm 1,10$	7,29	5,74	10,58	6,71-11,26
Fe	29	$68,29 \pm 3,90$	67,11	21,03	20,81	60,29-76,28
Mn	28	$3,00 \pm 0,06$	3,04	0,34	0,38	2,86-3,13
Zn	30	$33,76 \pm 0,91$	32,77	4,97	6,74	31,90-35,62

Избыточное поступление свинца может конкурентно ингибировать транспорт железа и кальция (Babalola et al., 2010; Jia et al., 2018), что необходимо учитывать при формировании селекционных программ в регионах с повышенным техногенным фоном. Медь и цинк в печени выступают кофакторами множества оксидоредуктаз, а их тканевая концентрация является надежным маркером общего минерального статуса и интенсивности пластического обмена. По содержанию эссенциальные элементы в печени располагались в следующем порядке: Fe > Zn > Cu > Mn в соотношении 22,8 : 11,3 : 3,0 : 1,0. Из всех органов и тканей именно печень характеризуется максимальной концентрацией меди, что подчеркивает ее роль как основного генетически контролируемого депо этого элемента.

Анализ содержания меди и железа в печени выявил существенные межпородные расхождения с данными, полученными для мясного скота. В частности, исследование Нарожных (2019) показало, что уровень меди в печени герефордского скота втрое превышает аналогичный показатель у животных черно-пестрой породы, что является прямым следствием различий в аллелофонде генов, контролирующих синтез металлотионеинов и медьсодержащих ферментов. В экспериментах установлено, что уровень железа у черно-пестрого скота превышает аналогичный показатель у герефордской породы на 4,0 мг/кг (Нарожных, 2019). Подобная межпородная дифференциация подтверждает, что элементный статус печени является надежным биомаркером, позволяющим объективизировать генетические различия между породами разного направления продуктивности.

Таким образом, несмотря на биологически обоснованное депонирование микро- и макроэлементов в печени, их концентрация различается в зависимости от генотипа, породы и вида животных, что подтверждает селекционную ценность данных признаков. Установлено среднее содержание тяжелых металлов в печени здоровых быков черно-пестрой породы, которые могут быть предварительно приняты за референсные значения интерьерной нормы. Полученные данные обосновывают возможность использования элементного статуса печени в качестве критерия косвенной оценки племенной ценности и селекции на оптимизацию минерального гомеостаза. Комплексная оценка изменчивости и взаимосвязей макроэлементов в печени черно-пестрого скота была подробно рассмотрена нами ранее (Коновалова и др., 2014). Полученные в настоящем исследовании значения концентрации цинка в печени черно-пестрого скота согласуются с результатами наших работ, демонстрирующими выраженные межвидовые различия в накоплении этого элемента в печени животных Сибирского региона (Konovalova et al., 2017a), что подчеркивает необходимость учета видоспецифичных генетических механизмов при разработке региональных селекционных программ.

3.2.4. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в почках как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Почки выступают не только как ключевой орган экскреции, но и как важнейшее генетически контролируемое депо и барьер, регулирующий выведение и аккумуляцию химических элементов. Способность почечной ткани к селективному депонированию макро- и микроэлементов находится под строгим полигенным контролем и является значимым интерьерным признаком, отражающим адаптивный потенциал и породную специфику минерального обмена животного (Северин, 2006; Васильева, Конопатов, 2017).

В современной селекции сельскохозяйственных животных элементный статус почечной ткани рассматривается не с позиций токсикологии, а как комплексный биохимический маркер, позволяющий оценить эффективность барьерно-экскреторных механизмов организма и выявить скрытое генетическое разнообразие популяции (Шейко, 2021; Зиновьева и др., 2019). Межрегиональные и межпородные сравнения подтверждают, что уровень аккумуляции экотоксикантов в почках зависит не только от фоновой нагрузки, но и от генетической конституции животных. Например, исследования, проведенные в условиях техногенно измененных ландшафтов (на рекультивированных территориях), также демонстрируют выраженную вариабельность накопления тяжелых металлов в паренхиматозных органах крупного рогатого скота (Hasan et al., 2016). Тот факт, что даже в условиях повышенного экологического пресса наблюдается индивидуальная изменчивость барьерных функций, подтверждает наличие генетического резерва для направленной селекции на устойчивость к гиперкумуляции экотоксикантов. В качестве примера фоновой изменчивости: концентрация Cd в почках у коров из региона Воеводина (Северная Сербия) колебалась от 0,055 до 0,510 мг/кг влажного веса (Tomović et al., 2017), что демонстрирует широкий диапазон фенотипической изменчивости данного признака в разных популяциях.

Примечательно, что в ряде регионов мира базовые уровни аккумуляции свинца в почках могут быть сопоставимы с показателями экологически благополучных зон Западной Сибири (0,04 мг/кг), например, в Южной Нигерии (Maxwell, 2008), или даже ниже, как в отдельных провинциях Кореи (0,026 мг/кг) (Kim et al., 2016). Тот факт, что в наших условиях при сопоставимом низком фоновом уровне наблюдается высокая фенотипическая изменчивость (C_v для Pb = 47,7%), убедительно доказывает, что вариация данного признака обусловлена преимущественно генетическим разнообразием популяции, а не факторами внешней среды, что делает его пригодным для селекционной оценки.

В Таблице 8 представлены концентрации кадмия и свинца в почках бычков черно-пестрой породы.

Таблица 8 — Содержание и изменчивость тяжелых металлов в почках крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$	ПДК*
Cd	31	0,129 ± 0,014	0,120	0,080	0,123	0,100-0,158	0,25
Pb	29	0,044 ± 0,004	0,041	0,021	0,024	0,036-0,052	2,0

Примечание - *СанПиН 2.3.2.1078-01.

Установлено, что их соотношение составляет 3 : 1, тогда как у герефордов – 4,8 : 1 (Нарожных, 2019). Подобная специфика соотношения уровней концентрации Cd и Pb является прямым свидетельством породных различий в аллелофонде генов, контролирующих транспорт и депонирование данных элементов. В нашем случае концентрация кадмия в почках не превышает предельно допустимое значение (ПДК), равное 0,25 мг/кг (СанПиН 2.3.2.1078-01), что позволяет рассматривать наблюдаемую изменчивость как проявление нормы реакции генотипа, а не как следствие патологической интоксикации.

Наряду с токсикантами, важнейшим объектом селекционной оценки выступает содержание эссенциальных микроэлементов, интенсивность депонирования которых в почечной ткани жестко контролируется аллельным полиморфизмом транспортных белков и ферментных систем. В Таблице 9 представлены концентрации эссенциальных элементов в почках бычков черно-пестрой породы.

Ранжированный ряд эссенциальных элементов в почках имеет следующий вид: Fe > Zn > Cu > Mn в соотношении 55,6 : 19,8 : 3,3 : 1,0. Отметим, что архитектура данного ранжированного ряда идентична таковой в других исследованных органах, однако количественные соотношения элементов специфичны для почечной ткани, что подтверждает наличие

тканеспецифичных генетических механизмов регуляции минерального обмена (Нарожных и др., 2015в; Короткевич и др., 2026). Более высокая фенотипическая изменчивость наблюдалась по уровню Cu и Zn. Коэффициент вариации был выше в 1,8 раза по содержанию меди в почках в сравнении с изменчивостью марганца ($C_v = 28,4\%$ и $15,5\%$ соответственно). Сниженная вариабельность марганца косвенно указывает на более жесткий генетический контроль его гомеостаза на уровне нефронов, в то время как высокая генетическая изменчивость меди и цинка создает базу для селекционного отбора.

Таблица 9 - Содержание и изменчивость эссенциальных металлов в почках крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Cu	24	$3,22 \pm 0,19$	3,15	0,91	0,485	2,83-3,60
Fe	31	$55,01 \pm 2,80$	52,11	15,62	22,620	49,28-60,74
Mn	22	$0,99 \pm 0,03$	0,98	0,15	0,170	0,92-1,05
Zn	31	$19,60 \pm 1,21$	17,17	6,72	10,440	17,14-22,07

Анализ межпородных различий выявил существенные расхождения в минеральном статусе почек. У герефордов концентрация железа в почках была на 10,45 мг/кг ниже, чем у черно-пестрой породы (Нарожных, 2019). Подобная межпородная дифференциация подтверждает, что элементный статус почек является надежным биомаркером, позволяющим объективизировать генетические различия между породами разного направления продуктивности. Так, в зарубежных исследованиях зафиксированы статистически значимо более низкие концентрации молибдена и селена в почках у телят голштинской породы по сравнению с животными галисийской мясной породы (Pereira et al., 2018), что обусловлено различиями в генетических программах, контролирующих почечный клиренс данных элементов.

Таким образом, установлено, что уровни тяжелых и эссенциальных металлов в почках и их колебания различаются в зависимости от генотипа и

породы животных, что подтверждает селекционную ценность данных признаков. Полученные данные обосновывают возможность использования элементного статуса почек в качестве критерия косвенной оценки племенной ценности и селекции на оптимизацию минерального гомеостаза и экскреторной функции.

3.2.5. Фенотипическая изменчивость содержания металлов в легких как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Легкие выступают не только как орган газообмена, но и как первичный барьер на пути аэрогенного поступления химических элементов, чья способность к селективному депонированию находится под строгим полигенным контролем. В контексте оценки интерьерных признаков легочная ткань представляет собой высокоспецифичное депо, отражающее генетически обусловленную эффективность барьерно-накопительных механизмов организма (Петухов и др., 2016; Коновалова, 2015).

Результаты анализа содержания кадмия и свинца в легочной ткани бычков черно-пестрой породы представлены в Таблице 10. Важно подчеркнуть, что крайне низкая концентрация кадмия (в 63 раза ниже ПДК) и свинца свидетельствует о высокой эффективности генетически детерминированных барьерных функций легочного эпителия, предотвращающих системную интоксикацию и позволяющих рассматривать данный орган как надежный индикатор резистентности.

Таблица 10 - Содержание и изменчивость кадмия и свинца в легких у крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$	ПДК*
Cd	28	0,004 $\pm$ 0,000	0,003	0,001	0,001	0,003-0,004	0,25
Pb	28	0,169 $\pm$ 0,016	0,135	0,084	0,110	0,137-0,202	2,0

Примечание - *СанПиН 2.3.2.1078-01

Для целей селекции фундаментальное значение имеет выявленная

фенотипическая изменчивость: индивидуальные колебания концентрации Cd были примерно в два раза ниже, чем для Pb ($C_v = 25\%$ и 50% соответственно). Такая вариабельность в условиях стандартизированного содержания подтверждает наличие генетической аддитивной генетической дисперсии, что создает базу для направленного отбора животных с повышенной резистентностью к аэрогенным экотоксикантам.

Наряду с токсикантами, важнейшим объектом селекционной оценки выступает содержание эссенциальных микроэлементов, интенсивность депонирования которых в легочной ткани жестко контролируется аллельным полиморфизмом транспортных белков.

Таблица 11 - Содержание и изменчивость эссенциальных металлов в легких крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Cu	28	$1,33 \pm 0,05$	1,34	0,26	0,255	1,23-1,43
Fe	28	$212,53 \pm 13,14$	198,00	68,28	83,00	185,50-239,56
Mn	28	$0,45 \pm 0,06$	0,34	0,34	0,19	0,32-0,58
Zn	28	$20,23 \pm 0,50$	20,63	3,10	4,23	19,03–21,43

Ранжированный ряд эссенциальных элементов в легких имеет следующий вид: Fe > Zn > Cu > Mn в соотношении 472 : 45 : 3 : 1. Архитектура данного ранжированного ряда кардинально отличается от таковой в почках, печени и сердце, что подтверждает наличие тканеспецифичных генетических механизмов регуляции минерального обмена. Особенно следует обратить внимание на то, что содержание Fe в легких было в 10,5 раза выше, чем Zn, что обусловлено генетически запрограммированной высокой аффинностью легочной ткани к гем-содержащим белкам (гемоглобину и цитохромам), обеспечивающим клеточное дыхание.

Низкая фенотипическая изменчивость характерна для Zn и Cu, коэффициент вариации которых был в 3 раза ниже, чем для Mn и Fe. Сниженная вариабельность цинка и меди косвенно указывает на более

жесткий генетический контроль их гомеостаза на уровне легочных альвеолоцитов.

Анализ межпородных и межвидовых различий выявил существенные расхождения в минеральном статусе легких. Аккумуляция железа у бычков черно-пестрой породы выше в 1,9 раза, чем у герефордов (Нарожных, 2019), что является прямым следствием различий в аллелофонде генов, контролирующих транспорт и депонирование данного элемента. Аналогичным образом, у свиней скороспелой мясной породы (СМ-1) в легких уровень железа был выше в 1,5 раза по сравнению с КРС (Зайко, 2014). Подобная дифференциация подтверждает, что элементный статус легких является надежным биомаркером, позволяющим объективизировать генетические различия между видами и породами.

Таким образом, установлено, что уровни тяжелых и эссенциальных металлов в легких и их колебания различаются в зависимости от генотипа и породы животных, что подтверждает селекционную ценность данных признаков. Полученные данные обосновывают возможность использования элементного статуса легких в качестве критерия косвенной оценки племенной ценности и селекции на оптимизацию барьерно-накопительных функций дыхательной системы.

3.2.6. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в селезенке как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Селезенка выступает не только как орган иммунного и гематологического контроля, но и как важнейшее генетически детерминированное депо железа и других эссенциальных элементов, участвующих в рециркуляции гемоглобина. Тканеспецифичность органа обуславливает его уникальную способность к селективному депонированию химических элементов, что делает минеральный профиль селезенки сложным полигенным интерьерным признаком, отражающим адаптивный потенциал и

интенсивность пластического обмена животного (Петухов и др., 2025; Короткевич и др., 2026).

Анализ накопления токсикантов показал, что уровень кадмия и свинца в селезенке имеет крайне низкие значения в сравнении с другими паренхиматозными органами (Таблица 12). Столь эффективное ограничение поступления экотоксикантов в данный орган свидетельствует о высокой напряженности генетически контролируемых барьерных механизмов, предотвращающих системную интоксикацию и сохраняющих гомеостаз кроветворной ткани.

Таблица 12 - Содержание и изменчивость тяжелых металлов в селезенке крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$	ПДК*
Cd	29	$0,0019 \pm 0,0001$	0,002	0,0008	0,0008	0,0016- 0,0022	0,25
Pb	30	$0,0280 \pm 0,0040$	0,023	0,0220	0,0138	0,020-0,036	2,0

Примечание - *СанПиН 2.3.2.1078-01

Тканеспецифичность распределения элементов ярко иллюстрируется различием в уровне кадмия в почках и селезенке (0,129 мг/кг и 0,0019 мг/кг соответственно). Подобная дифференциация подтверждает, что аккумуляция металлов не является стохастическим процессом, а жестко регулируется аллельным полиморфизмом транспортных белков, обеспечивающих экскрецию токсинов почками и их элиминацию из гематологического депо (Hasan et al., 2016).

Высокий уровень железа в селезенке обусловлен генетически запрограммированной функцией макрофагов красной пульпы по извлечению и рециркуляции железа из разрушенных эритроцитов с последующим его включением в пул трансферрина. Выявленная межпородная дифференциация: в сравнении с герефордами уровень железа у черно-пестрой породы был в 1,8 раза выше (Нарожных, 2019). Подобная

вариабельность подчеркивает необходимость учета генотипа и породной принадлежности при установлении региональных референсных значений интерьерных признаков и открывает перспективы для селекции на оптимизацию железистого обмена.

Таблица 13 - Содержание и изменчивость эссенциальных металлов в селезенке крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Cu	29	$0,79 \pm 0,01$	0,77	0,07	0,1000	0,76-0,82
Fe	28	$495,79 \pm 36,12$	465,00	191,12	210,7500	421,68-569,90
Mn	28	$0,24 \pm 0,01$	0,23	0,05	0,0525	0,22-0,26
Zn	30	$16,09 \pm 0,27$	15,80	1,47	1,5750	15,54-16,64

По содержанию эссенциальные металлы, как и в других исследованных органах, располагаются в последовательности $Fe > Zn > Cu > Mn$, но с иным соотношением: 2 065,8 : 67,1 : 3,3 : 1,0. Колоссальная разница в уровне железа и марганца (в 2 065,8 раза) подтверждает существование специфических генетических путей регуляции минерального обмена именно в гематологических тканях.

Фенотипическая изменчивость элементов в селезенке имеет свою специфику. В отличие от легких, где вариабельность цинка и меди была умеренной, для селезенки характерна более высокая вариабельность содержания железа ($C_v = 38,6\%$). Столь широкий диапазон индивидуальной изменчивости (от 210 до 800 мг/кг) в условиях стандартизированного содержания является доказательством наличия меньшей аддитивной генетической дисперсии. Это создает надежную базу для поиска направленного отбора животных с генетически обусловленной эффективностью эритропоэза и рециркуляции железа.

Таким образом, установлено, что элементный статус селезенки характеризуется высокой тканеспецифичностью и выраженной межпородной дифференциацией по уровню эссенциальных металлов. Полученные данные не только формируют нормативную базу референсных значений

интерьерных признаков для черно-пестрого скота, но и обосновывают возможность использования минерального профиля селезенки (в частности, вариабельности депонирования железа) в качестве дополнительного критерия косвенной оценки племенной ценности и селекции на повышение адаптивности и продуктивного долголетия животных.

3.2.7. Фенотипическая изменчивость содержания тяжелых металлов в волосе как критерий генетической вариабельности интерьерных признаков

Волос представляет собой уникальный метаболически неактивный матрикс после завершения кератинизации, который ретроспективно отражает минеральный статус организма в период его роста в фолликуле. Эта особенность делает волосяной покров идеальным неинвазивным биомаркером для массового скрининга в селекционной практике, позволяя оценивать генетически обусловленные особенности минерального обмена без стрессового воздействия на животное и необходимости его забоя (Нарожных, Купцов, 2015; Завьялов, 2020; Фролов и др., 2025а). Уникальная способность волоса служить «ретроспективным календарем» находит применение не только в элементологии, но и для оценки долгосрочных физиологических реакций, например, на технологические стрессоры, что подтверждается разработкой специализированных методов отбора проб с учетом скорости роста волоса (пат. RU 2852318 C1, Фролов и др., 2025а).

Использование волоса в качестве объекта генетико-селекционного мониторинга обладает рядом неоспоримых преимуществ: простота забора проб, стабильность образцов при транспортировке и хранении, а также высокая корреляционная связь с уровнем накопления элементов во внутренних органах (Brummer-Holder et al., 2020).

Результаты анализа концентраций химических элементов в волосе бычков черно-пестрой породы представлены в Таблице 14.

В наибольшей степени в волосе аккумулируется цинк (96,41 мг/кг),

уровень которого в 3,7 раза превышает содержание железа. Ранжированный ряд эссенциальных элементов имеет вид: $Zn > Fe > Mn > Cu$ в соотношении 13,0 : 3,5 : 1,3 : 1,0. Подобная инверсия по сравнению с внутренними органами (где, как правило, доминирует железо) обусловлена генетически детерминированным синтезом кератина, богатого цистинсульфгидрильными (тиольными) группами, обладающими высоким сродством к ионам цинка (Beernaert et al., 2007; McLean et al., 2009).

Таблица 14 - Содержание и изменчивость химических элементов в волосе крупного рогатого скота, мг/кг

Элемент	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	IQR	95% ДИ для $\bar{x}$
Cu	31	$7,39 \pm 0,200$	7,35	1,09	1,168	6,99-7,79
Fe	26	$25,95 \pm 2,220$	20,20	11,34	18,830	21,37-30,53
Mn	30	$9,73 \pm 0,460$	9,86	2,52	3,830	8,79-10,67
Zn	29	$96,41 \pm 1,010$	96,40	5,45	8,800	94,33-98,48
Cd	30	$0,013 \pm 0,001$	0,011	0,005	0,007	0,011-0,015

Межпородные различия служат прямым доказательством генетического контроля минерального обмена. Так, значения меди в волосе у герефордской и черно-пестрой пород достоверно различаются на 2,46 мг/кг ($P < 0,05$) (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-пестрой породы (Brummer-Holder et al., 2020), что указывает на различия в аллелофонде генов, регулирующих депонирование элементов в производных кожи у разных видов сельскохозяйственных животных.

В Таблице 15 представлены интегрированные коэффициенты аккумуляции и ранги органов, что позволяет провести сравнительную оценку депонирующей способности тканей.

Интегральная оценка через индекс аккумуляции (Rio) демонстрирует убывающий ряд депонирующей способности тканей: печень (0,68) > волосы (0,54) > сердце (0,50) > почки (0,39) > легкие (0,36) > мышцы (0,32) >

селезенка (0,21). Высокий ранг волоса (0,54), уступающий только печени, подтверждает его надежность как прокси-маркера для оценки общего минерального статуса животного

Таблица 15 - Ранжирование органов и тканей по концентрации эссенциальных элементов у черно-пестрого скота

Ткань, орган	Fe	Zn	Cu	Mn	Rio*
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

Примечание - * Rio - общий интегрированный коэффициент аккумуляции

Сопоставительный анализ с данными по другим популяциям (Oumak et al., 2017) подтверждает, что подобная функциональная специализация органов и тканей в метаболизме микроэлементов является консервативным генетическим признаком.

Таким образом, в ходе исследования установлены референтные значения и доверительные интервалы концентраций химических элементов в волосе быков черно-пестрой породы. Подтверждено, что фенотипическая вариабельность накопления элементов в волосе обладает значительной генетической компонентой, особенно по эссенциальным металлам. Полученные данные обосновывают возможность использования волосяного покрова в качестве надежного неинвазивного биомаркера для массового скрининга племенного поголовья, оценки генетической устойчивости к экотоксикантам и селекции на оптимизацию минерального гомеостаза без применения методов, требующих забоя животных.

Результаты, представленные в подразделе 3.2.7, получены автором лично и совместно с коллегами и опубликованы в работах: Petukhova, 2013;

Konovalova, 2014a; Коновалова, 2015; Нарожных и др., 2015a; Коновалова, 2016b; Коновалова, 2017; Konovalova et al., 2017a; Коновалова, 2018; Коновалова, Федяев, 2019; Федяев, Коновалова, 2019; Коновалова, 2020; Коновалова, 2023; Коновалова и др., 2024.

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

3.3.1. Гематологические и биохимические показатели крови

Оценка гематологического и биохимического статусов крови, выполненная совместно с О. И. Себежко и О. С. Короткевич (Осадчук и др., 2017a; Себежко, 2021, 2023a; Osadchuk et al., 2017) на базе кафедры ветеринарной генетики и биотехнологии Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий, позволяет судить об общем состоянии гомеостаза организма и рассматривается не только как инструмент физиологического мониторинга, но и как комплексная оценка важнейших интерьерных признаков, отражающих степень реализации генетического потенциала и адаптивную пластичность животных.

Гематологический профиль служит ключевым инструментом оценки интерьерного статуса животных, отражая кислородтранспортную функцию крови, неспецифическую резистентность и генетически детерминированную интенсивность метаболических процессов. Для крупного рогатого скота характерны видовые и породные колебания показателей крови, которые варьируют под влиянием сезона года, типа кормления и технологии содержания (Sebezhko et al., 2017b; Себежко и др., 2024), являясь проявлением фенотипической пластичности и адаптации к абиотическим факторам среды. Аналогичные закономерности отмечены и для быков-производителей молочных пород, минеральный обмен которых существенно трансформируется после длительного зимнего периода эксплуатации

(Абилов и др., 2021; Осадчук и др., 2017б). В связи с этим оценка гематологических параметров у быков черно-пестрой породы в условиях Западной Сибири представляет значительный научный и практический интерес для формирования популяционных норм интерьерных признаков. В таблице 16 представлены основные гематологические показатели быков черно-пестрой породы.

Таблица 16 - Гематологические показатели черно-пестрой породы

Показатель	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	Me	IQR	Lim	Стандартный интервал*
Эритроциты (RBC), $10^{12}/л$	$6,97 \pm 0,18$	6,98	1,17	4,38-8,59	5,0-7,5
Лейкоциты (WBC), $10^9/л$	$7,67 \pm 0,60$	7,15	5,33	2,9-15,2	5,0-12,0
Гемоглобин (Hb), г/л	$130,30 \pm 3,34$	128,10	28,4	96,4-168,4	95-126
СОЭ мм/ч	$0,66 \pm 0,07$	0,50	0,6	0,1-1,5	0,6-0,8
Цветной показатель	$1,240 \pm 0,047$	1,17	0,24	0,91-2,14	0,7-1,1

Примечание - * по данным О. Н. Полозюк, Т.М. Ушакова (2019), С. В. Васильева, Ю.В. Конопатов (2017), Г. С. Азаубаева (2004).

Анализ полученных данных показал, что содержание эритроцитов ($6,97 \pm 0,18 10^{12}/л$) и лейкоцитов ($7,67 \pm 0,60 10^9/л$) у подопытных животных находится в пределах физиологической нормы. В то же время отмечено незначительное превышение референсных значений по содержанию гемоглобина и цветного показателя.

Уровень гемоглобина ($130,30 \pm 3,34$ г/л) выходит за верхнюю границу стандартного интервала (126 г/л). Подобная эритроцитозная реакция интерпретируется не как патология, а как генетически обусловленная адаптивная реакция организма на климатические условия Западной Сибири, обеспечивающая высокую кислородтранспортную емкость крови. Данные

сдвиги свидетельствуют о высоком адаптивном потенциале данной популяции и ее способности поддерживать метаболический гомеостаз в условиях региона. Кроме того, на показатели красной крови влияет сезонность: по литературным данным, количество эритроцитов снижается на 18,8% в летний период по сравнению с осенним, а разница между зимним и летним уровнями лейкоцитов достигает 9,3% (Добровольский, 2014), что подтверждает наличие выраженной фенотипической пластичности данного интерьерного признака.

Уровень гемоглобина тесно коррелирует с числом эритроцитов, поскольку железо в составе гема является его структурным компонентом (Хиггинс, 2016). Это обуславливает необходимость контроля минерального обмена, особенно в периоды интенсивного роста или массового завершения жизненного цикла эритроцитов. Продуктом конечного распада гемоглобина выступает общий билирубин, уровень которого у черно-пестрого скота составляет 8,09 мкмоль/л, что соответствует верхней границе физиологической нормы (Васильева, Конопатов, 2017) и свидетельствует об удовлетворительной работе ферментных систем печени.

В Таблице 17 приведены данные по содержанию видов лейкоцитов в цельной крови быков черно-пестрой породы.

Таблица 17 - Лейкограмма и ЛКТ быков черно-пестрой породы

Лейкоциты, 10 ⁹ /л	Эозинофилы, %	Нейтрофилы, %		Лимфоциты, %	Моноциты, %	ЛКТ
		палочко- ядерные	сегменто- ядерные			
7,67 ± 0,60	1,27 ± 0,38	0,70 ± 0,145	16,800 ± 2,210	77,80 ± 2,70	2,03 ± 0,31	0,27 ± 0,05

Дифференциальный подсчет лейкоцитов дополняет картину интерьерного статуса, позволяя судить о сбалансированности иммунной системы. Нейтрофилы, составляющие основную долю клеток белой крови, в зависимости от степени зрелости подразделяются на палочкоядерные и сегментоядерные формы (Хиггинс, 2016). Отсутствие в лейкоформуле юных нейтрофилов и базофилов свидетельствует о гомеостазе и отсутствии патогенного процесса, что является необходимым базовым условием для

объективной оценки генетического потенциала продуктивности без искажающего влияния факторов внешней среды.

Биохимический профиль сыворотки крови включает белковый, липидный, углеводный и ферментный компоненты. Ранее нами были подробно охарактеризованы макроэлементы сыворотки крови животных черно-пестрой породы (Стрижкова и др., 2017). Основные биохимические показатели представлены в Таблице 18.

Таблица 18 - Основные биохимические показатели быков черно-пестрой породы

Показатель	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	Me	IQR	Lim	Стандартный интервал*
Общий белок, г/л	66,60 $\pm$ 2,61	65,50	24,8	45,20-88,60	60,00-85,00
Альбумины, г/л	21,30 $\pm$ 1,31	20,70	7,39	10,90-44,10	35,00-50,00
Глобулины, г/л	45,20 $\pm$ 2,51	43,40	21,1	20,30-65,20	35,00-60,00
Мочевина, ммоль/л	4,29 $\pm$ 0,19	4,38	1,28	1,90-5,76	3,30-3,60
Общий холестерин, ммоль/л	3,18 $\pm$ 0,15	2,96	0,78	1,80-5,6	2,06-4,00
Билирубин общий, мкмоль/л	8,09 $\pm$ 0,58	8,52	4,87	3,54-15,40	1,70-8,00
Билирубин прямой, мкмоль/л	1,97 $\pm$ 0,26	1,92	0,96	0-6,75	0,17-3,42
Глюкоза, ммоль/л	7,80 $\pm$ 0,34	7,51	2,90	4,67-10,60	2,50-3,90

Примечание - * А. П. Демидович (2019), С. В. Васильева, Ю.В. Конопатов (2017), А. Ф. Кузнецов (2016).

Анализ данных Таблицы 18 показал, что концентрация общего белка находится на нижней границе физиологической нормы для крупного рогатого скота. При этом уровень альбуминов примерно на 40% ниже стандартных значений. Альбумины выполняют транспортную и детоксикационную функции, а их концентрация отражает белок-синтетическую активность печени, которая является наследуемым интерьерным признаком, тесно связанным с интенсивностью роста и мясной

продуктивностью. Транспорт гемоглобина, меди и мочевой кислоты осуществляют $\alpha 2$ -глобулины (гаптоглобин, церулоплазмин, уратсвязывающий глобулин) (Рослый, 2015). На содержание общего белка и мочевины также оказывает влияние сезонный фактор (Осадчук и др., 2017а; Себежко и др., 2021).

Уровень глюкозы в сыворотке крови ($7,80 \pm 0,34$ ммоль/л) превышает нормативные показатели более чем в 2 раза. Данная гипергликемия рассматривается не как метаболическое нарушение, а как проявление стресс-индуцированной фенотипической пластичности (выброс кортизола в период предубойного содержания). Утилизация глюкозы происходит внутри клеток, где она преобразуется в аденозинтрифосфат (АТФ). Поскольку глюкоза является осмотически активным веществом, ее накопление в кровотоке сопровождается переходом воды из тканей в сосудистое русло (Хиггинс, 2016; Рослый, 2015). Почечный порог фильтрации глюкозы в исследованных образцах не был превышен, что подтверждает сохранность барьерных функций почек и адаптивность организма к кратковременному стрессу.

Показатель общего билирубина находится на верхней границе нормы. Являясь побочным метаболитом при распаде гемоглобина, билирубин удаляется из организма и транспортируется вместе с кровью к печени, где соединяется с глюкуроновой кислотой, образуя конъюгированный билирубин (Рослый, 2015).

Катаболизм белков оценивается по уровню мочевины. Концентрация мочевины у бычков черно-пестрой породы превышена на 0,7 ммоль/л по сравнению с физиологической нормой. Синтезируясь в печени, мочевина транспортируется кровью в почки и элиминируется с мочой, поэтому ее уровень отражает баланс между скоростью синтеза и выведения. Рост концентрации мочевины в сыворотке может быть следствием дегидратации, вызванной гипергликемией (при дегидратации усиливается реабсорбция мочевины в почечных канальцах), а также избыточного поступления протеина с кормами (Демидович, 2019). Особую селекционную значимость

имеет тот факт, что показатели азотистого обмена обладают выраженной генетической детерминацией. Ранее нами было доказано, что генотип быков-производителей голштинской породы достоверно влияет на уровень мочевины у потомства в условиях Западной Сибири (Себежко и др., 2020), что открывает перспективы для косвенной селекции на оптимизацию белкового обмена.

Интегральная оценка биохимического статуса бычков черно-пестрой породы свидетельствует об удовлетворительном состоянии метаболического гомеостаза и высокой адаптивной пластичности. Установленные средние популяционные значения могут служить референсными интервалами для характеристики биохимического статуса быков в возрасте 13–14 месяцев, формируя нормативную базу интерьерных признаков, критически важную для разработки селекционных программ и оценки племенной ценности животных, адаптированных к условиям Западной Сибири.

3.3.2. Ферменты крови как интерьерные маркеры интенсивности метаболизма и породной специфики

Оценка ферментативного статуса крови в контексте генетики и селекции рассматривается не как инструмент клинической диагностики, а как анализ комплексных интерьерных признаков, отражающих интенсивность метаболических процессов и адаптивную пластичность генотипа (Петухов и др., 2025; Hejna et al., 2018; Гудилин и др., 2000). Даже в условиях стандартизированного кормления и содержания генетически однородные группы животных одного пола, массы и возраста демонстрируют фенотипическую вариабельность активности ферментов, что свидетельствует и о наследственной обусловленности данных биохимических параметров и существовании различных внутripородных метаболических типов (Рослый, 2015; Кузнецов, 2016; Васильева, Конопатов, 2017).

В Таблице 19 представлены популяционные нормы активности ряда ферментов сыворотки крови для бычков черно-пестрой породы в возрасте 13-

14 месяцев, сформированные в результате исследований в условиях Западной Сибири (Себежко и др., 2023а). Установленные референсные интервалы служат базой для последующей косвенной оценки племенной ценности животных по признакам интенсивности обмена веществ.

Таблица 19 - Содержание ряда ферментов в сыворотке крови бычков чернопестрой породы, ед/л

Показатель	$\bar{x} \pm S \bar{x}$	Me	IQR	Lim	Стандартный интервал*
Амилаза, Ед/л	60,50 $\pm$ 4,06	57,60	30,70	29,70-107,50	41,0-98,0
АЛТ, Ед/л	20,70 $\pm$ 1,00	19,90	3,49	10,00-36,30	25,0-50,0
АСТ, Ед/л	19,10 $\pm$ 1,39	17,20	7,91	12,20-47,70	30,0-90,0
ЛДГ, Ед/л	1587,00 $\pm$ 60,30	1468,00	464,90	1165,00- 2102,00	500,0-1500,0
ГГТ, Ед/л	7,90 $\pm$ 1,24	6,02	4,13	1,51-30,90	4,9-26,0
Кислая фосфатаза общая, Ед/л	2,33 $\pm$ 0,56	1,55	1,18	0,18-10,40	-
Кислая фосфатаза простатическая, Ед/л	2,16 $\pm$ 0,62	1,05	1,93	0,09-9,96	-

Примечание - * С. В. Васильева, Ю.В. Конопатов (2017), Е. В. Громыко (2005).

Важным интерьерным маркером баланса анаболических и катаболических процессов выступает соотношение активности АСТ и АЛТ (коэффициент де Ритиса). В наших исследованиях данный показатель составил 0,92, что отражает преобладание анаболических процессов в печени, характерное для периода интенсивного роста молодняка и реализации генетического потенциала мясной продуктивности (Васильева, Конопатов, 2017). Подобная метаболическая направленность является благоприятным селекционным признаком, свидетельствующим об эффективном использовании питательных веществ на синтез мышечной ткани.

Активность лактатдегидрогеназы (ЛДГ), незначительно превышающая

верхнюю границу стандартного интервала, коррелирует с выявленным ранее уровнем глюкозы и отражает высокую напряженность гликолитических путей энергетического обеспечения (Рослый, 2015; Васильева, Конопатов, 2017). С точки зрения селекции, вариабельность ЛДГ может рассматриваться как индикатор индивидуальной резистентности и адаптивного ответа организма на факторы среды, что подтверждается данными об оценке фенотипической изменчивости ферментов у крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири (Себежко и др., 2023а; Шейко, 2021).

Примечательно, что активность АЛТ и АСТ у бычков черно-пестрой породы находится ниже стандартных клинических интервалов (20,70 и 19,10 Ед/л соответственно). Вместо клинической интерпретации как гипоферментемии, в генетико-селекционном аспекте данный факт трактуется как проявление породной специфики белкового обмена (Себежко и др., 2023а), а также отсутствия метаболического стресса. Низкий уровень цитолиз-содержащих ферментов при сохранении высоких показателей продуктивности подтверждает высокую гомеостатическую способность и адаптивность данного генотипа (Кочнева, Бутеева, 2015; Шейко, 2021).

Показатели гамма-глутамилтранспептидазы (ГГТ), находящиеся в пределах физиологической нормы, объективизируют отсутствие застойных явлений и высокую эффективность детоксикационных барьеров печени. Это является критически важным интерьерным признаком при оценке устойчивости животных к экзогенным нагрузкам, включая накопление эссенциальных и токсичных элементов.

Наиболее выраженной генетической детерминацией характеризуется активность щелочной фосфатазы (ЩФ). Ее вариабельность жестко обусловлена породной принадлежностью и этапом онтогенеза. Фундаментальные работы И. И. Гудилина с соавторами доказали, что повышенная активность ЩФ у свиней кемеровской породы в сравнении с другими является не случайным отклонением, а устойчивым интерьерным маркером, закрепленным в генофонде породы (Гудилин и др., 2000; Гудилин

и др., 2003). Таким образом, ферментный профиль крови выступает не просто отражением текущего физиологического состояния, а сложным полигенным признаком, пригодным для использования в качестве косвенного критерия отбора при формировании линий и популяций с оптимальным типом метаболизма.

3.3.3. Взаимосвязь биохимических показателей крови с уровнем накопления элементов в органах

В генетике и селекции сельскохозяйственных животных установление корреляционных связей между биохимическими параметрами крови и элементным статусом внутренних органов имеет фундаментальное значение. Подобные взаимосвязи свидетельствуют либо о плеiotропном действии генов, регулирующих как минеральный обмен, так и синтез специфических белков, что подтверждается результатами современных полногеномных исследований (Denholm et al., 2022), либо открывают перспективы для косвенной селекции, позволяя оценивать труднодоступные интерьерные признаки (накопление элементов в паренхиматозных органах) по легкодоступным прокси-маркерам (сыворотка крови, волос).

В рамках исследования черно-пестрых быков была изучена взаимосвязь между уровнем химических элементов в производных кожи и биохимическими параметрами сыворотки крови. Данные, представленные в Таблице 20, демонстрируют наличие статистически значимых корреляций, обосновывающих использование волоса как надежного неинвазивного маркера для массового скрининга племенного поголовья (Мирошников и др., 2016; Фролов и др., 2017; Завьялов, 2020).

Выявленная статистически значимая прямая взаимосвязь между концентрацией кадмия в волосах и активностью щелочной фосфатазы в крови ($P < 0,001$) указывает на то, что минеральный профиль производных кожи отражает системные метаболические процессы, контролируемые общими генетическими механизмами, в частности, полиморфизмом генов,

отвечающих за транспорт и детоксикацию металлов (Тарасова и др., 2019).

Таблица 20 - Корреляция (по Спирмену) между тяжелыми металлами в волосе и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Cd волос – щелочная фосфатаза	26	$0,646 \pm 0,114$	4,151	0,000 360
Cd волос – амилаза	26	$-0,394 \pm 0,166$	-2,101	0,046 324
Cd волос – ЛДГ	24	$-0,620 \pm 0,126$	-3,706	0,001 231
Cu волос – альбумин	26	$0,401 \pm 0,165$	2,147	0,042 086

Обнаруженная обратная корреляция между уровнем лактатдегидрогеназы (ЛДГ) и содержанием кадмия в волосах ($P < 0,001$), а также между амилазой и кадмием ($P < 0,05$), с селекционной точки зрения может интерпретироваться как проявление индивидуальной генетической variability ферментативной активности. В условиях стандартизированного кормления такая variability свидетельствует о существовании различных внутрипородных метаболических типов, что создает базу для отбора животных с оптимальной интенсивностью пластического обмена.

Анализ взаимосвязей элементного статуса легких с биохимическим профилем (Таблица 21) выявил положительную корреляцию между содержанием меди в легких и уровнем глюкозы в крови. Эта связь, вероятно, отражает генетическую координацию энергетического метаболизма и структурного синтеза: медь, являясь кофактором цитохром-С-оксидазы в цикле Кребса (Хиггинс, 2016), участвует в обеспечении клеток альвеол энергией, необходимой для синтеза гликозаминогликанов и поддержания барьерной функции легочной ткани.

Положительная корреляция марганца со щелочной фосфатазой может отражать его вовлеченность в регуляцию метаболических процессов, контролируемых полигенными системами. Отрицательная связь цинка в легких с цветным показателем крови указывает на сложную генетическую регуляцию эритропоэза, где пул цинка, необходимый для функционирования

металлопротеинов (Калетина, 2008), конкурирует с процессами синтеза гемоглобина.

Таблица 21 - Корреляция (по Спирмену) между тяжелыми металлами в легких и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Mn легкие – щелочная фосфатаза	24	$0,445 \pm 0,164$	2,329	0,029 413
Cu легкие – глюкоза	24	$0,412 \pm 0,169$	2,123	0,045 163
Zn легкие – ЦП	28	$-0,452 \pm 0,150$	-2,585	0,015 686

В селезенке (Таблица 22) отмечена отрицательная корреляция между уровнем железа и активностью сывороточной щелочной фосфатазы. Данная связь объясняется сложными регуляторными взаимодействиями в системе кроветворения: интенсивное высвобождение гемного железа из разрушенных эритроцитов макрофагами селезенки может сопровождаться компенсаторным снижением потребности в активности ЩФ, участвующей в дифференцировке клеток костного мозга (Ansari et al., 2022). Это подтверждает наличие тканеспецифичных генетических механизмов, координирующих минеральный обмен в гематологических депо.

Таблица 22 - Корреляция (по Спирмену) между тяжелыми металлами в селезенке и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Cd селез. – АСТ	25	$-0,437 \pm 0,162$	-2,330	0,028 897
Cd селез. – щелочная фосфатаза	25	$0,487 \pm 0,153$	2,676	0,013 474
Fe селез. – щелочная фосфатаза	25	$-0,452 \pm 0,159$	-2,432	0,023 201
Zn селез. – щелочная фосфатаза	26	$0,391 \pm 0,166$	2,082	0,048 160
Fe селез. – конъюгированный билирубин	25	$-0,416 \pm 0,165$	-2,196	0,038 408
Pb селез. – ЦП	30	$0,417 \pm 0,151$	2,425	0,021 986
Pb селез. – протеин	26	$-0,433 \pm 0,159$	-2,353	0,027 120

Печень, являясь главным депо и органом детоксикации, демонстрирует

тесную генетическую связь между накоплением элементов и синтезом белков крови (Таблица 23).

Таблица 23 - Корреляция (по Спирмену) между тяжелыми металлами в печени ткани и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Pb печень – холестерин	25	$-0,589 \pm 0,131$	-3,495	0,001 952
Zn печень – холестерин	25	$-0,553 \pm 0,139$	-3,181	0,004 159
Cd печень – ЛКТ	15	$0,704 \pm 0,130$	3,572	0,003 411
Cu печень – молочная кислота	23	$-0,427 \pm 0,170$	-2,164	0,042 095
Fe печень – протеин	25	$-0,407 \pm 0,167$	-2,136	0,043 511
Fe печень – альбумин	25	$-0,521 \pm 0,146$	-2,929	0,007 540
Zn печень – глобулин	26	$0,390 \pm 0,166$	2,075	0,048 830

Отрицательная корреляция между содержанием железа в печени и уровнем альбумина ($r = -0,521$) объясняется не патологией, а генетически детерминированной конкуренцией за ресурсы белкового синтеза: при высокой интенсивности депонирования железа в виде ферритина или гемосидерина наблюдается компенсаторное перераспределение пула аминокислот. Положительная корреляция между цинком в печени и глобулинами крови ($P < 0,05$) обусловлена тем, что в организме цинк транспортируется специфическими белками-переносчиками, такими как альфа-2-макроглобулин и альбумины (Anderson, 2004), синтез которых жестко контролируется геномом.

Анализ взаимосвязей в мышечной ткани (Таблица 24) выявил отрицательную корреляцию между цинком и глюкозой ($r = -0,419$).

С позиций физиологии адаптации, это может рассматриваться как проявление фенотипической пластичности: на фоне высокой интенсивности роста и активного потребления глюкозы происходит направленное депонирование цинка в мышечной ткани для обеспечения синтеза металлопротеинов и антиоксидантной защиты, что согласуется с данными о

роли цинка в регуляции метаболических путей и утилизации питательных веществ у сельскохозяйственных животных (Sloup, 2017). Это формирует обратную статистическую зависимость.

Таблица 24 - Корреляция (по Спирмену) между тяжелыми металлами в мышечной ткани и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Pb мышцы – АЛТ	12	$-0,599 \pm 0,185$	-2,367	0,039 454
Fe мышцы – щелочная фосфатаза	26	$0,420 \pm 0,162$	2,264	0,032 867
Zn мышцы – глюкоза	26	$-0,419 \pm 0,162$	-2,258	0,033 308
Fe мышцы – LDH	24	$-0,469 \pm 0,159$	-2,488	0,020 878
Zn мышцы – LDH	24	$-0,496 \pm 0,154$	-2,681	0,013 659
Mn мышцы – неконъюгированный билирубин	26	$0,451 \pm 0,156$	2,473	0,020 848
Cd мышцы – ЦП	30	$0,366 \pm 0,158$	2,079	0,046 889
Cd мышцы – кислая фосфатаза общая	23	$-0,594 \pm 0,135$	-3,381	0,002 820
Cd мышцы – кислая фосфатаза простатическая	22	$-0,519 \pm 0,156$	-2,713	0,013 394

В миокарде (Таблица 25) прямая корреляция между концентрацией кадмия и уровнем глюкозы ($r = 0,453$) может отражать индивидуальные особенности метаболического ответа, т.е. генетическую предрасположенность к определенному типу энергетического обмена и эффективности использования корма (Сермягин и др., 2023), при котором поддержание гомеостаза в сердечной мышце требует мобилизации специфических ферментативных каскадов.

Положительные корреляции между содержанием цинка в сердечной ткани и уровнями билирубина свидетельствуют о сложной генетической регуляции мембранной стабильности эритроцитов и эффективности процессов конъюгации в печени, что может служить дополнительным

интерьерным маркером при оценке общей резистентности организма.

Таблица 25 - Корреляция (по Спирмену) между тяжелыми металлами в миокарде и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Cd сердце – АЛТ	26	$-0,446 \pm 0,157$	-2,439	0,022 470
Cd сердце – глюкоза	26	$0,453 \pm 0,156$	2,488	0,020 179
Zn сердце – общий билирубин	26	$0,419 \pm 0,162$	2,262	0,033 011
Zn сердце – неконъюгированный билирубин	26	$0,449 \pm 0,157$	2,460	0,021 496
Cu сердце – молочная кислота	25	$-0,447 \pm 0,160$	-2,395	0,025 165
Mn сердце – кислая фосфатаза общая	23	$-0,523 \pm 0,151$	-2,815	0,010 380
Mn сердце – кислая фосфатаза простатическая	22	$-0,539 \pm 0,151$	-2,864	0,009 592

В почечной ткани (Таблица 26) положительная корреляция между уровнем Cd и концентрацией церулоплазмينا в сыворотке ($r = 0,563$) указывает на активацию механизмов острой фазы, направленных на ограничение окислительного стресса. Церулоплазмин в данном случае выступает не только как фермент, но и как генетически детерминированный маркер системного адаптивного ответа на метаболическую нагрузку, поскольку активность подобных антиоксидантных ферментов находится под строгим генетическим контролем (Колесникова и др., 2013), компенсирующим нарушения обмена меди и железа.

Важно отметить, что величина и направление связи между одними и теми же показателями варьируют в зависимости от органа и ткани. Так, в селезенке между Fe и щелочной фосфатазой существует отрицательная связь ($r = -0,452$), а в мышцах – положительная ($r = 0,420$). Подобная вариабельность доказывает, что минеральный обмен регулируется не глобальными факторами среды, а сложной системой тканеспецифичных генетических программ. Для обобщения таких многомерных данных в

селекции все чаще применяются современные подходы, такие как нелинейный анализ главных компонент, позволяющие выявлять специфические метаболические паттерны, ассоциированные с высокой продуктивностью и адаптивностью (Нарожных, 2019; Нохрин и др., 2024).

Таблица 26 - Корреляция по Спирмену между тяжелыми металлами в почках и биохимическими показателями

Коррелирующие признаки	n	Spearman r_s	t (N-2)	p-value
Fe почки – амилаза	26	-0,442 ± 0,158	-2,417	0,023 580
Zn почки – ЛДГ	24	-0,430 ± 0,166	-2,236	0,035 763
Cd почки – холестерин	25	-0,475 ± 0,155	-2,586	0,016 491
Mn почки – конъюгированный билирубин	18	0,545 ± 0,166	2,599	0,019 379
Cd почки – ЦП	30	0,563 ± 0,125	3,608	0,001 188
Fe почки – ЦП	30	-0,435 ± 0,148	-2,558	0,016 222
Fe почки – кислая фосфатаза простатическая	22	0,439 ± 0,172	2,184	0,041 026

Таким образом, выявленные корреляционные паттерны доказывают, что элементный статус органов и биохимический профиль крови представляют собой единую, генетически детерминированную систему. Это обосновывает возможность разработки комплексных селекционных индексов, включающих биохимические прокси-маркеры для прижизненной, неинвазивной оценки генетической устойчивости животных к метаболическим нагрузкам и целенаправленного отбора на оптимизацию минерального гомеостаза.

3.3.4 Корреляция тяжелых металлов внутри органов и тканей как проявление плейотропного генетического контроля минерального обмена

Актуальность изучения корреляционных взаимоотношений между химическими элементами внутри органов заключается не только в оценке текущего физиологического статуса, но и в выявлении интерьерных признаков. Анализ синергизма и антагонизма элементов на тканевом уровне позволяет судить о плейотропном действии генов, кодирующих универсальные транспортные белки и металлосвязывающие ферменты, которые регулируют гомеостаз нескольких ионов одновременно (Goyer, 1997; Тарасова и др., 2019).

В Таблице 27 представлены значимые корреляции между микроэлементами внутри органов и тканей у бычков черно-пестрой породы. Анализ полученных паттернов позволяет интерпретировать их через призму генетической детерминации тканеспецифичного метаболизма.

Как отмечено выше в разделе 3.3.3, взаимосвязи в печени определяются функциональными задачами гепатоцитов. В печени наблюдаются положительные корреляции между экотоксикантами и эссенциальными элементами (Коновалова и др., 2014), что, вероятно, свидетельствует об индукции защитных белков, связывающих как кадмий, так и медь с цинком. Подобная ко-регуляция подтверждает наличие общих генетических путей детоксикации и депонирования (Тарасова и др., 2019), что критически важно учитывать при оценке племенной ценности животных по признакам устойчивости к метаболическому стрессу (Назаренко, 2024; Мирошников и др., 2018).

Большее количество положительных ассоциаций присутствует в легочной ткани (Коновалова, 2015), что отражает высокую напряженность генетического контроля барьерных функций респираторного тракта. Множественные связи между железом, марганцем, цинком и медью указывают на кооперативное участие этих элементов в окислительно-восстановительных процессах, регулируемых полигенными системами антиоксидантной защиты (Колесникова и др., 2013; Нотова и др., 2020).

Таблица 27 - Корреляция тяжелых металлов внутри органов и тканей быков черно-пестрой породы

Коррелирующие элементы	n	r ± Sr	Коррелирующие элементы	n	r ± Sr
Печень			Сердце		
Cu-Cd	17	0,630 ± 0,200	Cu-Cd	30	0,427 ± 0,170
Zn-Pb	30	0,458 ± 0,170	Cu-Zn	30	0,603 ± 0,150
Сыворотка			Mn-Fe	28	0,525 ± 0,170
Mn-Cu	26	-0,632 ± 0,160	Легкие		
Zn-Fe	27	0,486 ± 0,170	Fe-Cu	28	0,509 ± 0,170
Мышцы			Zn-Cu	28	0,639 ± 0,150
Fe-Cd	31	0,710 ± 0,130	Cd-Cu	28	0,439 ± 0,180
Mn-Cd	31	0,430 ± 0,170	Fe-Mn	28	0,376 ± 0,180
Mn-Cu	31	0,400 ± 0,170	Fe-Zn	28	0,508 ± 0,170
Mn-Fe	31	0,606 ± 0,150	Fe-Cd	28	0,402 ± 0,180
Pb-Zn	14	0,568 ± 0,240	Mn-Zn	28	0,593 ± 0,160
Почки			Mn-Cd	28	0,388 ± 0,180
Fe-Cd	31	-0,505 ± 0,160	Zn-Cd	28	0,531 ± 0,170
Zn-Cd	31	-0,493 ± 0,160	Селезенка		
Fe-Cu	24	0,447 ± 0,190	Cd-Cu	28	0,668 ± 0,150
Mn-Cu	22	0,487 ± 0,200	Fe-Mn	26	-0,406 ± 0,180
Pb-Cu	22	0,619 ± 0,180	Pb-Zn	30	0,510 ± 0,170
Zn-Cu	24	0,451 ± 0,190	Волос		
Fe-Zn	31	0,608 ± 0,150	Fe-Cu	26	0,414 ± 0,190
Mn-Zn	22	0,468 ± 0,200	Fe-Cd	25	0,439 ± 0,180

Примечание - r – коэффициент корреляции, Sr – стандартная ошибка коэффициента корреляции.

Отрицательная связь цинка в легких с цветным показателем крови указывает на сложную генетическую регуляцию эритропоэза, где пул цинка, необходимый для функционирования металлопротеинов (Калетина, 2008), конкурирует с процессами синтеза гемоглобина.

Установленная положительная связь между концентрациями кадмия и меди в печени, сердце, легких и селезенке не является случайной стохастической ассоциацией, а обусловлена конкурентным связыванием на уровне рецепторов транспортера двухвалентных металлов (DMT1) и металлотионеинов (Brzóska, Moniuszko-Jakoniuk, 2001). С генетической точки зрения, это свидетельствует о том, что направленный отбор по уровню накопления одного элемента неизбежно повлечет за собой коррелированный сдвиг по другому, что требует разработки комплексных селекционных индексов.

Наибольшее количество корреляционных связей наблюдается для меди и железа (по 32,4% от общего числа ассоциаций), что подчеркивает ключевую роль генов гем-содержащих белков и цитохромов в формировании общего минерального профиля организма. Увеличение содержания Cd в органах сопровождается закономерным перераспределением эссенциальных элементов (Cu, Zn, Fe), что является фенотипическим проявлением адаптивной реакции генома на метаболическую нагрузку (Alonso et al., 2004). Однако в почках рост уровня Cd приводит к уменьшению содержания Zn и Fe, что указывает на нарушение генетически заданных механизмов канальцевой реабсорбции и требует селекции на повышение резистентности почечной ткани (Yang, Shu, 2015).

Отметим, что в волосе взаимосвязи железа с медью и кадмием имеют положительный характер, что подтверждает статус волосяного покрова как интегрального неинвазивного биомаркера, аккумулирующего информацию о системном генетически детерминированном минеральном обмене за длительный период (Завьялов, 2020; Мирошников и др., 2016).

Таким образом, полученные данные об уровнях корреляционных значений доказывают, что элементный статус органов представляет собой единую, генетически обусловленную сеть взаимосвязей. Выявленные паттерны ко-накопления элементов обосновывают возможность разработки комплексных селекционных индексов и косвенной оценки племенной

ценности животных по труднодоступным для прижизненного анализа интерьерным признакам.

3.3.5. Корреляция тяжелых металлов между органами и тканями

Для разработки методов косвенной селекции и прижизненной оценки племенной ценности критически важно установить корреляционные связи между уровнем элементов в легкодоступных биосубстратах (волос, сыворотка крови) и их депонированием в паренхиматозных органах. Элементный статус производных кожи является стабильным интерьерным маркером, отражающим генетически детерминированные особенности минерального обмена, здоровья и адаптационной способности животных (Мирошников и др., 2016; Калашников и др., 2017; Скальный и др., 2021). В настоящее время запатентованы и успешно применяются способы определения уровня химических элементов в органах крупного рогатого скота, свиней и птиц по их содержанию в волосе и щетине, в том числе разработаны методы селекционного отбора бычков с высокой интенсивностью роста на основе оценки уровня токсических элементов в шерстном покрове (Петухов и др., 2005, 2007; Короткевич и др., 2015а, 2015б; Коновалова, 2015; Мирошников и др., 2021). Таким образом, волос выступает надежным прокси-маркером для элементной биоиндикации и селекционной работы.

В рамках настоящего исследования были проанализированы межэлементные корреляции и взаимосвязи между содержанием металлов в различных органах и тканях крупного рогатого скота. В Таблице 28 представлены коэффициенты корреляции, отражающие взаимосвязь между уровнем цинка и кадмия.

Установлены высокие отрицательные корреляции между уровнем цинка в волосе, сыворотке крови, легких и мышцах, с одной стороны, и содержанием кадмия в мышцах, почках и селезенке – с другой (r = от -0,59 до -0,74). Одновременно зафиксирована положительная связь уровня кадмия в

волосе с концентрацией цинка в почках ($r = 0,509$). С генетической точки зрения, данное антагонистическое взаимодействие обусловлено плейотропным действием генов, кодирующих металлотioneины – белки, осуществляющие конкурентное связывание ионов Zn и Cd. Это подтверждает наличие общих генетических путей регуляции детоксикации и гомеостаза данных элементов (Оберлис и др., 2008; Brzóska, Moniuszko-Jakoniuk, 2001).

Таблица 28 - Связь металлов токсикантов с эссенциальными элементами

Коррелирующие элементы	n	$r \pm Sr$	Коррелирующие элементы	n	$r \pm Sr$
Cd мышцы - Zn волос	29	$-0,724 \pm 0,090$	Cd почки - Zn печень	30	$0,767 \pm 0,070$
Cd мышцы - Zn сыворотка	28	$-0,742 \pm 0,080$	Cd мышцы - Zn печень	30	$0,680 \pm 0,100$
Cd почки - Zn легкие	28	$-0,697 \pm 0,100$	Cd волос - Zn почки	30	$0,509 \pm 0,130$
Cd селезенка - Zn мышцы	29	$-0,587 \pm 0,120$	Cd печень - Zn почки	17	$0,720 \pm 0,120$
Cd селезенка - Zn печень	29	$-0,721 \pm 0,090$			

Высокий уровень корреляции отмечен между цинком в почках и кадмием в печени ($r = 0,72$), что свидетельствует о синхронной активации защитных механизмов на уровне этих органов.

Взаимоотношение кадмия и свинца рассматривается во многих современных исследованиях. В Таблице 29 приведены сведения о достоверной связи данных элементов.

Наибольшая корреляция выявлена между уровнем свинца в печени и кадмия в почках ($r = 0,932$; $p < 0,01$). Высокая степень сопряженности накопления данных элементов свидетельствует о том, что их транспорт и депонирование контролируются общими генетическими механизмами, вероятно, через систему транспортеров двухвалентных металлов (DMT1), что формирует устойчивый фенотипический паттерн накопления экотоксикантов в организме (Goyer, 1997).

Таблица 29 - Связь между кадмием и свинцом в органах и тканях

Коррелирующие элементы	n	r±Sr	Коррелирующие элементы	n	r±Sr
Cd мышцы - Pb легкие	28	0,513 ± 0,14	Cd селезенка - Pb печень	29	-0,414 ± 0,15
Cd почки - Pb печень	30	0,932 ± 0,02	Cd селезенка - Pb мышцы	13	-0,772 ± 0,11
Cd волос - Pb почки	28	0,576 ± 0,13			

В нашей работе также была найдена закономерность во взаимосвязях между кадмием и железом (Таблица 30).

Таблица 30 - Связь между кадмием и железом в органах и тканях

Коррелирующие элементы	n	r±Sr	Коррелирующие элементы	n	r±Sr
Cd волос - Fe печень	28	-0,958 ± 0,02	Cd мышцы - Fe печень	29	0,846 ± 0,05
Cd печень - Fe сердце	15	-0,556 ± 0,18	Cd волос - Fe мышцы	30	0,852 ± 0,05
Cd селезенка - Fe мышцы	29	-0,761 ± 0,08	Cd легкие - Fe селезенка	26	0,560 ± 0,13
Cd селезенка - Fe печень	28	-0,674 ± 0,10	Cd сердце - Fe печень	29	0,553 ± 0,13
Cd волос - Fe легкие	27	0,529 ± 0,14			

Установлена положительная связь между кадмием в мышцах и содержанием железа в печени ($r = 0,846$; $p < 0,01$). Данная корреляция может отражать системную компенсаторную метаболическую адаптацию, при которой накопление Cd сопровождается генетически запрограммированной аккумуляцией Fe в гепатоцитах как элемента антиоксидантной и детоксикационной защиты организма. В то же время, сильная отрицательная корреляция между железом в печени и кадмием в волосе ($r = -0,958$; $p < 0,01$)

указывает на сложную перекрестную регуляцию феррокинетики на уровне транскрипции генов, отвечающих за синтез ферритина и трансферрина (Оберлис и др., 2008).

Медь является переходным металлом, и её ионы имеют схожие химические свойства с ионами цинка и кадмия. Наибольшее количество достоверных межорганных связей среди исследованных элементов было найдено именно между медью и кадмием (Таблица 31).

Таблица 31 - Связь между кадмием и медью в органах и тканях

Коррелирующие элементы	n	r±Sr	Коррелирующие элементы	n	r±Sr
Cd волос - Cu печень	26	-0,515 ± 0,14	Cd печень - Cu легкие	17	-0,712 ± 0,12
Cd почки - Cu печень	27	0,855 ± 0,05	Cd селезенка - Cu мышцы	29	-0,536 ± 0,13
Cd мышцы - Cu печень	27	-0,557 ± 0,13	Cd селезенка - Cu печень	26	-0,874 ± 0,05
Cd печень - Cu почки	11	0,664 ± 0,17			

Так, наибольшая положительная взаимосвязь присутствует между кадмием в почках и содержанием меди в печени ($r = 0,855$; $p < 0,01$), а наибольшая отрицательная – между кадмием в селезенке и медью в печени ($r = -0,874$; $p < 0,01$). Положительная корреляция, вероятно, обусловлена компенсаторными механизмами: накопление кадмия стимулирует перераспределение меди в печени, где она выступает кофактором ферментов антиоксидантной защиты (например, супероксиддисмутаза), играющих ключевую роль в нейтрализации окислительного стресса, индуцированного кадмием.

В Таблице 32 приведены сведения о корреляциях содержания одного и того же элемента в разных органах и тканях.

Таблица 32 - Связь металла между органами и тканями

Коррелирующие элементы	n	r±Sr	Коррелирующие элементы	n	r±Sr
Fe мышцы - Fe легкие	28	0,628 ± 0,11	Cd печень - Cd почки	17	0,739 ± 0,11
Fe мышцы - Fe сердце	28	0,703 ± 0,10	Cd печень - Cd селезенка	16	-0,701 ± 0,13
Fe волос - Fe сыворотка	24	-0,514 ± 0,15	Cd мышцы - Cd печень	17	0,771 ± 0,10
Fe волос - Fe мышцы	26	0,589 ± 0,13	Cd волос - Cd печень	16	-0,605 ± 0,16
			Cd мышцы - Cd селезенка	29	-0,909 ± 0,03
Zn сыворотка - Zn печень	28	-0,636 ± 0,11	Mn волос - Mn печень	27	-0,686 ± 0,1

Отметим наличие положительной взаимосвязи между содержанием железа в мышцах и в сердце ($r = 0,703$; $p < 0,01$). Данная связь обусловлена высокой функциональной значимостью железа в составе гемопротеинов (миоглобина и цитохромов), что отражает их общую зависимость от аэробного энергетического обмена и синхронную генетическую регуляцию потребления кислорода (Короткевич и др., 2026; Георгиевский и др., 1979).

Содержание кадмия в мышцах и селезенке продемонстрировало сильную отрицательную взаимозависимость ($r = -0,909$; $p < 0,01$). Эти данные позволяют предположить, что селезенка, выступая в качестве генетически детерминированного «депо» для секвестрации кадмия, активно препятствует его проникновению в мышечную ткань, что формирует наблюдаемую обратную корреляцию.

Далее приведены данные о связи между марганцем и медью в органах и тканях (Таблица 33).

Положительная корреляция между содержанием меди в мышцах и марганца в печени ($r = 0,605$; $p < 0,01$) может быть обусловлена общностью их физиологических функций как кофакторов ферментов антиоксидантной защиты и синхронной регуляцией механизмов всасывания при адаптации к оксидативному стрессу. Однако в работе установлено преобладание

отрицательных корреляций между данными элементами.

Таблица 33 - Связь между марганцем и медью в органах и тканях

Коррелирующие элементы	n	$r \pm Sr$	Коррелирующие элементы	n	$r \pm Sr$
Cu мышцы - Mn печень	28	$0,605 \pm 0,12$	Cu печень - Mn сердце	27	$-0,777 \pm 0,08$
Cu печень - Mn мышцы	27	$-0,555 \pm 0,13$	Cu почки - Mn легкие	21	$-0,524 \pm 0,16$
Cu почки - Mn печень	21	$0,518 \pm 0,16$	Cu печень - Mn легкие	25	$-0,563 \pm 0,14$

Наибольшее значение отрицательной корреляции было между Cu в печени и Mn миокарда ($r = -0,777$, $p < 0,01$). Данная связь указывает на конкурентные или компенсаторные механизмы распределения микроэлементов, при которых повышение накопления Cu в депо (печени) сопровождается снижением транспортировки Mn в метаболически активную сердечную ткань, что отражает участие этих элементов в перекрестной генетической регуляции ферментативных систем.

Таким образом, выявленные корреляционные плеяды свидетельствуют о сложной системе межэлементных взаимодействий, основанных на синергизме и антагонизме металлов, которые имеют четкую генетическую детерминацию. Эти данные доказывают, что элементный статус организма представляет собой единую, генетически обусловленную сеть взаимосвязей, что обосновывает возможность разработки комплексных селекционных индексов и косвенной оценки племенной ценности животных по труднодоступным для прижизненного анализа интерьерным признакам.

Результаты, представленные в разделах 3.3.1 – 3.3.5, получены нами лично и совместно с коллегами и опубликованы (Себежко и др., 2023а, 2023б; Коновалова, 2015; Нарожных, Стрижкова, Коновалова, 2015; Коновалова, 2016б).

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 расчета племенной ценности (Петухов и др., 1989; 2007; Эрнст и др., 2008; Нарожных и др., 2019; Mateescu et al., 2013; Tizioto et al., 2015). Важно учитывать, что фенотипическая реализация генетического потенциала по минеральному обмену модифицируется условиями эксплуатации и сезонными факторами (Абилов и др., 2021), однако именно выделение аддитивной генетической компоненты позволяет формировать линии и популяции с заданным типом метаболизма.

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 счет включения интерьерных маркеров элементного гомеостаза. Это отвечает стратегическим задачам мобилизации собственного генофонда и повышения генетической устойчивости стад (Дунин и др., 2021а, 2021б; Дунин, 2025). Кроме того, доказано, что породная принадлежность и генотип оказывают существенное влияние на репродуктивные качества самцов и биоматериал (Sebezhko et al., 2017b), что обосновывает необходимость комплексной генетической экспертизы производителей.

У крупного рогатого скота изучено содержание меди в мышечной

ткани сыновей разных быков-производителей. Установлена достоверная разность между некоторыми производителями по уровню меди в мышцах потомков (Таблица 34).

Таблица 34 - Влияние генотипа быков-производителей на аккумуляцию меди в мышечной ткани сыновей, мг/кг

Кличка быка	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me
Фабио	12	$1,150 \pm 0,143$	0,900
Брио	8	$0,775 \pm 0,051$	0,820
Бонэир	6	$0,740 \pm 0,062$	0,795
Малстрем	8	$0,582 \pm 0,108$	0,630
В среднем	34	$0,971 \pm 0,093$	0,835

В мышечной ткани сыновей Фабио концентрация меди оказалась в 2 раза выше ($p < 0,05$), чем у потомков Малстрема, что прямо свидетельствует о наличии аллельных различий, определяющих эффективность транспорта и депонирования Cu. Различия между группами Бонэир и Брио статистически не значимы, что позволяет предположить наличие у них общих генетических факторов, контролирующих метаболизм данного микроэлемента. Ранжированный ряд быков-производителей по концентрации меди у сыновей имел вид: Малстрем (0,582) < Бонэир (0,740) $\approx$ Брио (0,775) < Фабио (1,150) в соотношении 1,0 : 1,3 : 1,3 : 2,0.

Таблица 35 - Изменчивость уровня меди в мышечной ткани животных

Кличка быка	σ	Q1	Q3	IQR	lim
Фабио	0,420	0,856	1,435	0,119	0,55-2,10
Брио	0,153	0,675	0,858	0,237	0,53-0,95
Бонэир	0,153	0,617	0,861	0,345	0,5-0,90
Малстрем	0,386	0,371	0,793	0,782	0,1-0,99
В среднем	0,545	0,788	1,154	0,352	0,1-2,10

Для уровня меди в мышечной ткани характерна высокая фенотипическая изменчивость, степень которой варьировала в зависимости

от генотипа отца, что подтверждает тканеспецифичную экспрессию генов, контролирующих минеральный обмен (Таблица 35). Сила влияния генотипа отцов на содержание меди в мышечной ткани (показатель rw) составила 0,25 ($F = 3,74$; $p = 0,0215$): 25 % общей фенотипической изменчивости признака обусловлено наследственными факторами, что делает его пригодным для селекционного улучшения.

Таблица 36 - Дисперсионный анализ влияния генотипа отцов на содержание меди в мышечной ткани

Источник вариации	df	SS	MS	F-statistic	P
Генотип отцов	3	1,17	0,389	3,74	0,0215
Остаточная вариация	30	3,13	0,104		

Примечание - SS - сумма квадратов; MS - средний квадрат; F-statistic - значение критерия Фишера; P - уровень значимости.

Для выявления специфических межгрупповых различий был проведен апостериорный тест Тьюки (Tukey HSD). В Таблице 37 представлены различия между группами с 95%-ми доверительными интервалами и уровнем значимости для каждой сравниваемой пары. Визуализация этих сравнений показана на Рисунке 2.

Таблица 37 - Сравнение потомства отцов по содержанию меди в мышечной ткани

Сравниваемые пары	Разность	Нижний 95% ДИ	Верхний 95% ДИ	P
Брио - Бонэир	0,00055	-0,462	0,463	1,000
Фабио - Бонэир	0,28985	-0,156	0,735	0,307
Малстрем - Бонэир	-0,19958	-0,673	0,274	0,665
Фабио - Брио	0,28929	-0,105	0,684	0,213
Малстрем - Брио	-0,20014	-0,627	0,226	0,585
Малстрем - Фабио	-0,48943	-0,897	-0,081	0,014

Данные теста Тьюки (Таблица 37) и графическое представление доверительных интервалов (Рисунок 2) однозначно указывают на наличие статистически значимых различий ($p=0,014$) только между крайними

группами – потомством быков Малстрем и Фабио. Различия между остальными группами не достигли порога статистической значимости, что типично для полигенных признаков с умеренной наследуемостью.

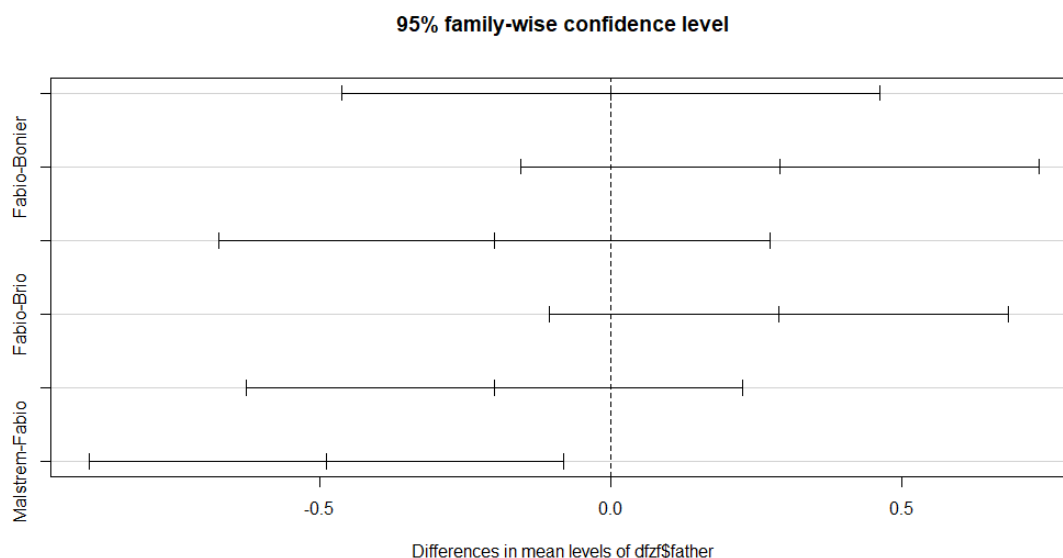


Рисунок 2-Разность между группами отцов с 95%-ми доверительными интервалами

Кластерный анализ (Рисунок 3) подтвердил обособленность потомства быка Фабио, характеризующегося максимальной концентрацией меди. Потомки остальных производителей образовали общий кластер, что генетически интерпретируется как их сходство по аллелям, ассоциированным с низким уровнем аккумуляции Cu в скелетной мускулатуре.

Проведенные исследования показали наличие в изученной популяции выраженной генетической изменчивости по уровню меди в мышечной ткани. Полученные данные согласуются с результатами R. S. Tizioto и соавторов (2015), установивших коэффициент наследуемости (h^2) уровня меди в мышечной ткани у скота породы Нелоре на уровне 0,30, что подтверждает возможность эффективного отбора по данному признаку.



Рисунок 3-Дендрограмма сходства концентрации меди в мышечной ткани сыновей
некоторых быков-производителей

В отличие от мышц, распределение меди в печени потомства различных производителей демонстрировало иную закономерность (Таблица 38).

Таблица 38 - Влияние генотипа отцов на аккумуляцию меди в печени потомков, мг/кг

Кличка быка	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	Q1	Q3	IQR	lim
Малстрем	8	$49,4 \pm 12,6$	37,5	35,6	12,4	52,3	39,9	7,4-110,0
Бонэйр	6	$38,5 \pm 8,1$	44,0	20,0	13,5	59,2	45,7	8,0-61,0
Фабио	11	$27,6 \pm 3,2$	29,0	10,5	14,7	33,0	18,2	10,0-43,0
Брио	9	$18,2 \pm 2,8$	17,0	8,5	9,22	27,7	18,9	6,4-32,0
В среднем	34	$42,3 \pm 4,9$	25,5	28,6	11,9	35,7	23,7	6,4-110,0

Ранжированный ряд быков-производителей по концентрации меди в печени потомков имел вид: Брио (18,2) < Фабио (27,6) < Бонэйр (38,5) < Малстрем (49,4) в соотношении 1,0 : 1,5 : 2,1 : 2,7. При этом фенотипическая изменчивость по уровню Cu в печени была выше, чем в мышечной ткани. Ранжирование быков по влиянию на накопление меди в печени оказалось

зеркальным по отношению к мышечной ткани (бык Малстрем лидирует по печени, но имеет минимальные значения в мышцах), что является проявлением тканеспецифичной генетической регуляции: одни и те же аллели по-разному модулируют экспрессию транспортёров в гепатоцитах и миоцитах. В среднем содержание меди в печени было более чем в 30 раз выше, чем в мышечной ткани ($p < 0,001$). Сила влияния генотипа отцов на содержание меди в печени ($r_w = 0,25$) оказалась такой же, как для мышечной ткани.

Таблица 39 - Дисперсионный анализ влияния генотипа отцов на содержание меди в печени

Источник вариации	df	SS	MS	F-statistic	P
Генотип отцов	3	2791	930	2,24	0,104
Остаточная вариация	30	12477	416		

Примечание - SS - сумма квадратов, MS - средний квадрат, F-statistic - значение критерия Фишера, P - уровень значимости.

Для выявления межгрупповых различий по содержанию меди в печени потомства быков-производителей был проведен множественный сравнительный анализ с использованием критерия Тьюки.

Таблица 40 - Сравнение потомства отцов по содержанию меди в печени

Сравниваемые пары	Разность	Нижний 95% ДИ	Верхний 95% ДИ	P
Брио - Бонэир	-20,8667	-50,0927	8,3594	0,232
Фабио - Бонэир	-11,9696	-40,1129	16,1735	0,658
Малстрем - Бонэир	1,8416	-28,1061	31,7895	0,998
Фабио - Брио	8,8969	-16,0271	33,8210	0,766
Малстрем - Брио	22,7083	-4,2367	49,6534	0,122
Малстрем - Фабио	13,8113	-11,9552	9,5779	0,474

Результаты теста Тьюки не выявили достоверных различий между отдельными парами групп ($p > 0,05$) из-за высокой внутригрупповой изменчивости признака и малых выборок, при которых параметрические

критерии консервативны. Поэтому дополнительно применён непараметрический критерий Крускала–Уоллиса с апостериорным тестом Данна (поправка Холма): установлено достоверное влияние генотипа отца — содержание меди в печени у сыновей Малстрема в 2,7 раза превышало таковое у потомков Брио (49,4 против 18,2 мг/кг; $p < 0,05$) (Коновалова, 2024а). Следовательно, генотип отца влияет на аккумуляцию меди и в печени, однако здесь наследственные различия маскируются более высокой остаточной изменчивостью признака.

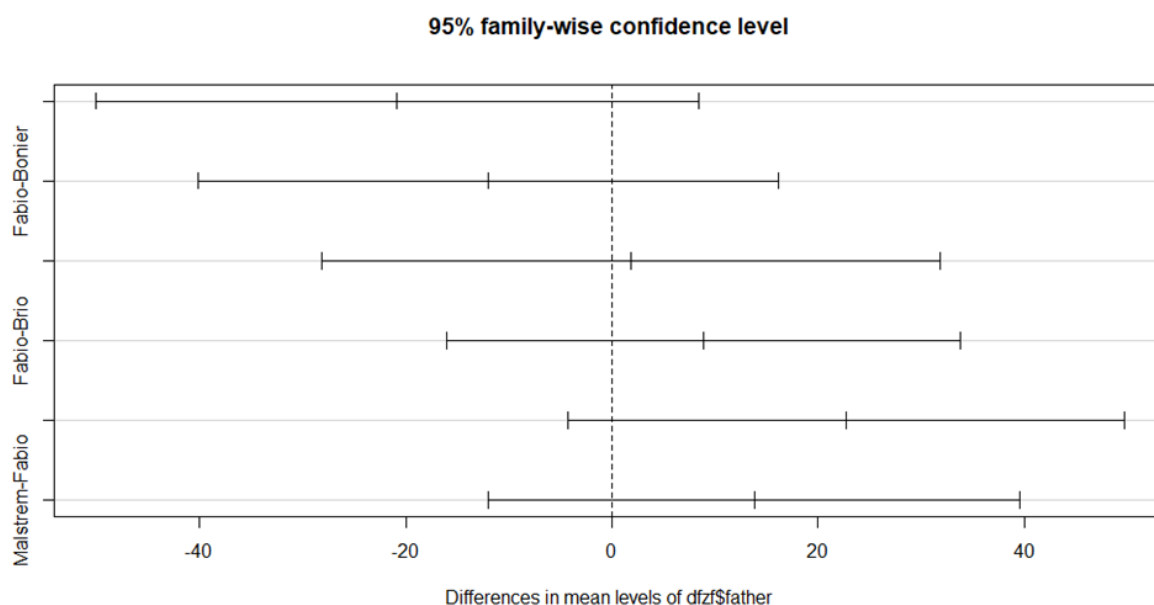


Рисунок 4 - Разность между группами отцов с 95%-ми доверительными интервалами

Влияние генотипа быков-производителей на устойчивость и предрасположенность к аккумуляции меди в почках подтверждается данными Таблицы 41.

Установлено, что потомство быка Малстрема характеризуется наиболее высоким содержанием меди в почках, достоверно превышая показатели сыновей Фабио в 1,3 раза ($p < 0,01$). Потомство быков Брио и Бонэир также значительно превосходило потомков Фабио по данному показателю ($p < 0,05$). Отличительной чертой данных, полученных при анализе почек, является относительно низкая индивидуальная изменчивость уровня меди, значительно уступающая вариабельности, зафиксированной в мышечной ткани и печени.

Таблица 41 - Влияние генотипа отцов на аккумуляцию меди в почках потомков, мг/кг

Кличка быка	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me	σ	Q1	Q3	IQR	lim
Малстрем	8	$4,330 \pm 0,122$	4,25	0,392	4,00	4,66	0,660	3,9-4,9
Бонэир	6	$4,010 \pm 0,254$	4,30	0,616	3,73	4,60	0,867	3,0-4,6
Фабио	11	$3,270 \pm 0,143$	3,30	0,487	3,10	3,85	0,750	2,5-4,0
Брио	8	$4,050 \pm 0,084$	4,05	0,262	3,84	4,32	0,475	3,7-4,4
В среднем	33	$3,850 \pm 0,114$	4,00	0,589	3,53	4,40	0,867	2,5-4,9

Наибольшая фенотипическая изменчивость уровня меди в почечной ткани характерна для сыновей Малстрема (Рисунок 5). Соотношение крайних вариантов было 1 : 1,26. Концентрация меди характеризовалась низким межквартильным размахом у потомства быка Фабио.

Ранжированный ряд быков-производителей по содержанию меди в почках потомков 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.

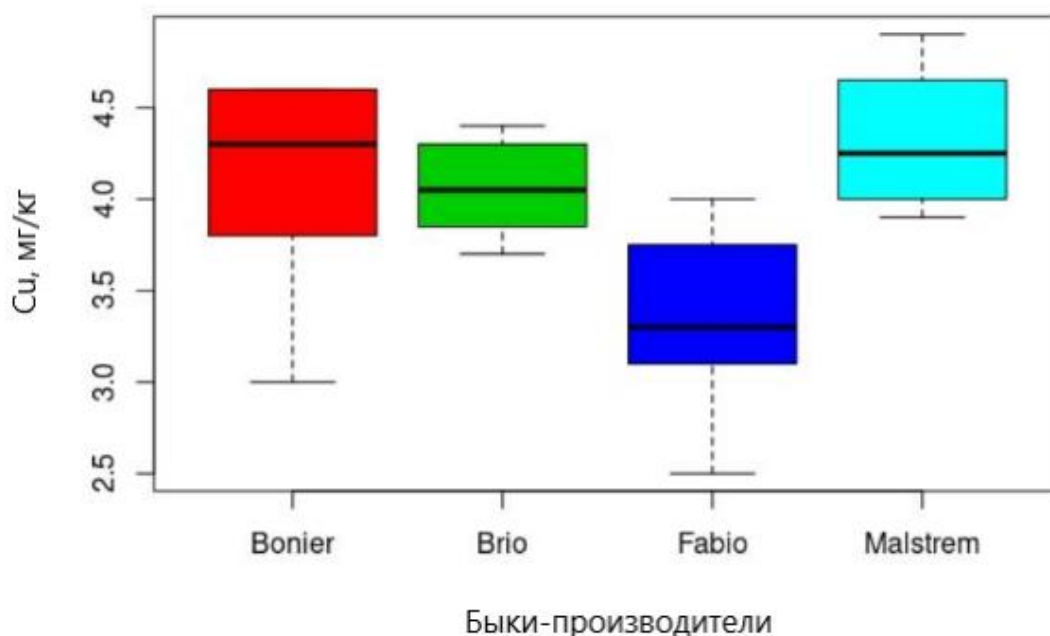


Рисунок 5 - Диаграмма размаха концентрации меди в почках сыновей быков-производителей голштинской породы

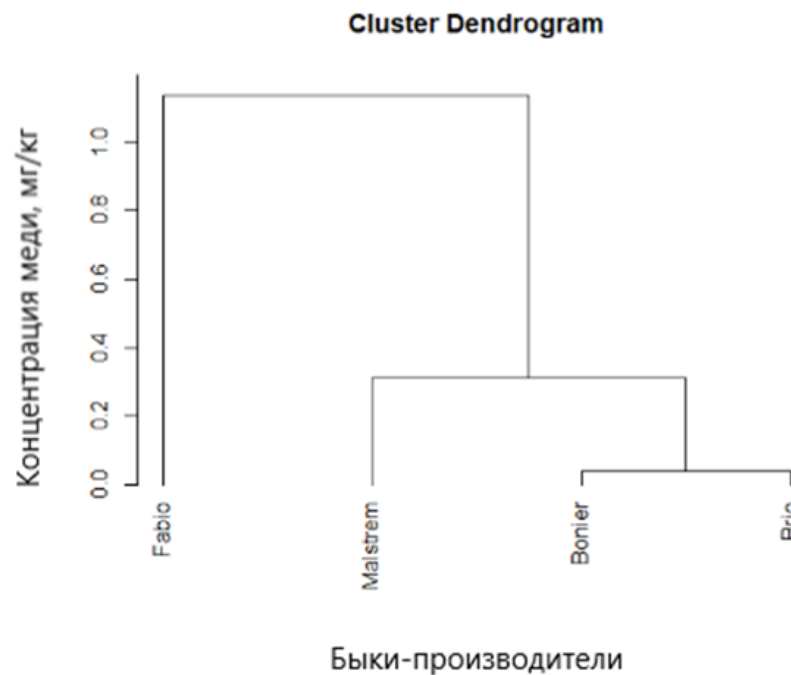


Рисунок 6 - Дендрограмма сходства концентраций меди в почках сыновей быков производителей голштинской породы

Дендрограмма наглядно демонстрирует формирование двух основных кластеров: первый объединяет потомков быков Бонэир и Брио, характеризующихся средними значениями; второй кластер образует потомство быка Малстрема с максимальным содержанием Cu ; потомство Фабио с минимальными значениями стоит особняком, что подтверждает данные описательной статистики.

Ключевым селекционно-генетическим результатом является высокая сила влияния генотипа отцов на содержание меди в почках потомства: $r_w = 0,48$ ($p < 0,01$). Полученные данные свидетельствуют, что доля генетической дисперсии, обусловленной действием генов отцов, в почечной ткани значительно выше, чем в печени и мышечной ткани. Это доказывает, что почечная ткань является наиболее информативным биомаркером (интерьерным маркером) для оценки племенной ценности быков-производителей по признакам минерального гомеостаза.

По содержанию меди два изученных органа и ткань располагались в

следующем порядке: печень > почки > мышцы в соотношении: 43,6 : 4,0 : 1,0.

Результаты исследования демонстрируют выраженное влияние аддитивных генетических факторов быков-производителей на концентрацию меди в ткани и органах потомства. Важно отметить, что ткань и органы не демонстрировали единого паттерна в отношении аккумуляции меди. Так, потомство Малстрема характеризовалось повышенной предрасположенностью к накоплению меди в печени и почках, а Фабио - в мышцах. Не было выявлено производителей, демонстрирующих общую устойчивость или восприимчивость к накоплению элементов во всех органах и тканях. Гетерогенность аккумуляции меди в различных тканях обусловлена тканеспецифичной генетической регуляцией: устойчивость и восприимчивость к накоплению металлов в разных органах контролируются различными, независимыми генетическими системами (локусами).

Генетическая детерминация уровня устойчивости или восприимчивости у разных видов сельскохозяйственных животных подтверждается данными некоторых исследователей. Мингжун Л. с соавторами (2019) установили, что бараны-производители романовской породы различаются по способности влиять на накопление цинка в шерсти своего потомства: у сыновей одних отцов содержание цинка было на 60 % выше, чем у сыновей других. Эксперименты на свиньях породы СМ-1 выявили генетическую обусловленность накопления элементов в органах и тканях, зависящую от генофонда семейств и линий (Зайко и др., 2013а, 2013в, 2014), а также доказали существенное влияние генотипа отца на интерьерные показатели потомков свиней (Камалдинов, 2012). Аналогичная наследственная обусловленность выявлена нами и в отношении обмена железа, где генотип отцов достоверно определял его концентрацию в волосяном покрове сыновей голштинской породы (Коновалова, Федяев, 2019). Примечательно, что подобная тканеспецифическая наследственная детерминация характерна и для других эссенциальных элементов: ранее нами было установлено влияние генотипа быков-производителей голштинской

породы на содержание марганца в скелетной мускулатуре их сыновей (Коновалова, 2023).

В настоящей работе подтверждено влияние генотипа быков-производителей на содержание меди в органах и мышечной ткани потомства. Полученные данные обосновывают возможность внедрения в селекционную практику критериев оценки племенной ценности быков-производителей по признакам тканеспецифичной аккумуляции элементов. Разработанные прижизненные неинвазивные методы оценки уровня накопления элементов в производных кожи (патенты № 2421726, № 2602915, № 2426119) открывают возможности для массового биотехнологического скрининга племенного поголовья без убоя животных (Короткевич и др., 2011а, 2011б; Коновалова и др., 2016а). Для интеграции выявленных генетических закономерностей в селекционный процесс перспективно составление простых линейных моделей и индексов для прогноза племенной ценности быков-производителей по признакам минерального обмена и адаптивности (Калашников и др., 2020; Петухов и др., 2025).

Результаты, представленные в разделе 3.4.1, получены нами лично и совместно с коллегами и опубликованы (Коновалова, 2024а).

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

В предыдущем разделе представлены данные, свидетельствующие о роли генотипа быков-производителей в детерминации устойчивости и восприимчивости их потомства к аккумуляции меди в отдельных органах и ткани. Другим подходом к выяснению наследственной обусловленности уровня тяжелых металлов в организме животных является изучение межпородной дифференциации по концентрации микроэлементов. Изучение подобных межпородных 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 тяжелых металлов в организме животных. Исследования проведены на животных голштинской, черно-пестрой и герефордской пород. Для элиминирования фактора внешней среды и доказательства генетической природы признака были проведены совместные исследования содержания элементов в основных компонентах среды: воде, почве и кормах (Сысо и др., 2017а; Syso et al., 2017). Биогеохимический мониторинг подтвердил отсутствие токсической нагрузки (концентрации ниже ПДК), что является критически важным методологическим условием: оно позволяет трактовать выявленную фенотипическую вариабельность и как проявление аддитивной генетической дисперсии, обусловленной породной принадлежностью.

В Таблице 42 показано содержание меди в мышечной ткани крупного рогатого скота трех пород Западной Сибири.

Таблица 42 - Содержание меди в мышечной ткани разных пород крупного рогатого скота Западной Сибири

Порода	n	$\bar{x} \pm S\bar{x}$	Me
Голштинская	34	$0,971 \pm 0,093$	0,835
Черно-пестрая	34	$1,760 \pm 0,090$	1,500
Герефордская	28	$1,030 \pm 0,030$	1,020

Установлено, что содержание меди в мышечной ткани животных статистически значимо варьирует в зависимости от породы. Наиболее высокая концентрация Си обнаружена в мышечной ткани скота черно-пестрой породы, где она на 80 % превышала уровень голштинской породы ($P < 0,001$) и на 70 % – герефордской ($P < 0,001$).

Ранжирование пород по уровню меди в мышцах демонстрирует следующую закономерность: голштинская = герефордская < черно-пестрая (соотношение 1,0 : 1,1 : 1,8). Оценка индивидуальной вариабельности уровня меди в мышцах выявила различия между голштинской и герефордской

породами (Таблица 43).

Таблица 43 - Изменчивость уровня меди в мышечной ткани пород крупного рогатого скота Западной Сибири

Порода	n	σ	Q_1	Q_3	IQR	lim	Отношение крайних вариант
Черно-пестрая	34	0,326	1,40	1,730	0,300	1,1-2,9	1,0 : 2,6
Голштинская	34	0,361	0,55	0,902	0,352	0,1-2,1	1,0 : 21
Герефордская	28	0,160	0,90	1,130	0,230	0,8-1,3	1,0 : 1,6

Соотношение крайних вариант у них было 1,0 : 2,6; 1,0 : 21,0 и 1,0 : 1,6 соответственно.

Размах уровня меди в мышцах был значительно выше среди животных черно-пестрой породы (Рисунок 7).

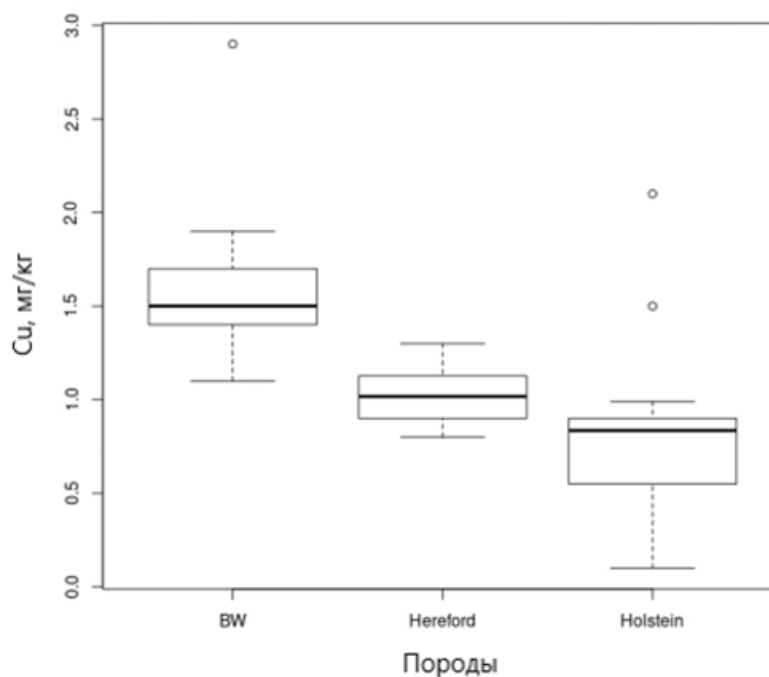


Рисунок 7 - Диаграмма размаха меди в мышечной ткани животных разных пород

На рисунке видно, что наибольшее отклонение от медианы к низкой концентрации характерно для голштинского скота.

Полигоны распределения животных разных пород представлены на Рисунке 8.

Ключевым селекционно-генетическим результатом является то, что показатель силы влияния (r_w) генофонда трех пород Западной Сибири на содержание меди в мышечной ткани составил 0,64. Это свидетельствует о значительной доле влияния генетических факторов на уровень меди в мышцах.

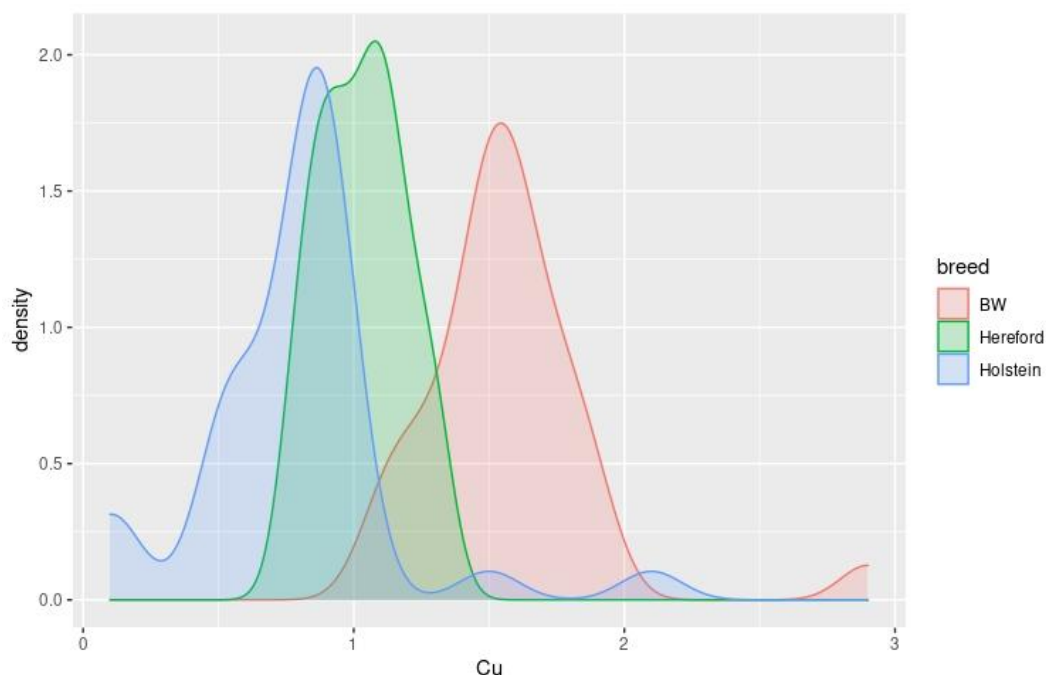


Рисунок 8 - Полигоны распределения уровня меди в мышцах животных

Бразильские популяции скота Nelore продемонстрировали значительное генетическое разнообразие, согласно данным, полученным Tizioto et al. в 2015 году. Наследование уровня меди в длиннейшей мышце спины (*longissimus dorsi*) оценивалось как умеренное: коэффициент наследуемости h^2 составил 0,30.

Средняя концентрация меди в этой мышечной ткани равна $1,8 \pm 0,05$ мг/кг, что удивительно близко к значениям, которые мы зафиксировали у черно-пестрого скота, разводимого в Западной Сибири. Авторы связывают регуляцию содержания меди в мышечной ткани с генами, находящимися на хромосоме 18, и предлагают TRNAA-AGC и CDH8 в качестве перспективных кандидатов, обладающих аддитивным эффектом.

Для ангусской породы выявлен относительно высокий коэффициент наследуемости (h^2) только для уровня железа в *longissimus dorsi*, который равен $0,48 \pm 0,08$. Показано, что при одинаковом рационе голштинская порода накапливает меди в печени медленнее и в меньшем количестве, чем джерсейская (Soch et al., 2010). Породная специфика метаболизма минеральных элементов подтверждается и данными по содержанию токсичных металлов в молоке: у коров симментальской породы концентрации свинца, кадмия и меди в молоке были достоверно ниже, а железа и магния – выше, чем у голштинских коров, содержащихся в идентичных условиях органического хозяйства (Pilarczyk et al., 2013). Подобная тканеспецифичная и породоспецифичная экспрессия указывает на плейотропное действие генов продуктивности на минеральный гомеостаз.

Данные межпородные различия в аккумуляции эссенциальных микроэлементов в мышцах могут быть обусловлены меньшей мышечной массой и более высокой метаболической активностью печени у животных молочного направления по сравнению с мясными породами. При этом научной группой Pereira установлена отрицательная корреляционная связь между убойным выходом туши и концентрацией микроэлементов в мышечной ткани (Pereira et al., 2018). Аналогичные закономерности, связывающие продуктивные качества и уровень накопления тяжелых металлов, были выявлены и у мясного скота: в частности, установлена достоверная корреляция убойной массы с содержанием экотоксикантов в органах и тканях бычков герефордской породы (Нарожных и др., 2015б).

Современные подходы к геномной селекции мясного скота основаны на использовании полногеномного анализа ассоциаций (GWAS) и одношагового геномного наилучшего линейного несмещенного прогноза (ssGBLUP), что позволяет выявлять гены-кандидаты, ассоциированные с признаками продуктивности, такими как живая масса, среднесуточный прирост и эффективность использования корма (Селионова и др., 2023).

На голштинизированном черно-пестром скоте Урала ($n = 85$, ~139 тыс.

SNP) GWAS-анализ выявил QTL, ассоциированные с продуктивными признаками, на 13 хромосомах. Среди генов-кандидатов идентифицирован DGAT1 (BTA14), ZNF16 (BTA16), ARHGAP39 (BTA22), SERPINA5 (BTA21) и IGF1 (BTA5), варианты которых потенциально влияют на липидный обмен и опосредованно могут модифицировать усвоение эссенциальных микроэлементов. Анализ ROH-паттернов в трех поколениях продемонстрировал к росту геномного инбридинга: F_ROH увеличился от $0,086 \pm 0,011$ в первом поколении до $0,127 \pm 0,017$ в третьем, что свидетельствует о снижении генетического разнообразия в условиях интенсивного отбора по продуктивным признакам (Сермягин и др., 2020).

Эти данные подчеркивают, что форсированный отбор по продуктивным признакам сопряжен не только со снижением генетического разнообразия, но и с потенциальными корреляционными сдвигами в метаболизме микроэлементов, что обосновывает необходимость включения интерьерных признаков, включая элементный статус, в комплексные селекционные программы.

Коэффициенты наследуемости концентраций Mn, Mg, P, Na, K и Zn были в пределах 0,00-0,15. Исследований, связанных с генетическими маркерами, проведено очень мало. Между тем, стремительное развитие технологий редактирования генома сельскохозяйственных животных открывает новые перспективы для точной идентификации и модификации генов-кандидатов, контролирующих метаболизм микроэлементов (Донник и др., 2023). В то время как для традиционных хозяйственно полезных признаков, таких как молочная продуктивность, уже успешно применяются сложные алгоритмы отбора SNP-маркеров для повышения точности геномного прогнозирования (Кощаев, Аврахам, 2025), для интерьерных признаков, связанных с минеральным обменом, подобная методологическая база только формируется. Не получены однозначные результаты молекулярно-генетического детерминирования уровня элементов у всех видов сельскохозяйственных животных.

Таким образом, установлено влияние породной принадлежности на содержание меди в мышечной ткани крупного рогатого скота. Сила влияния (r_w) генофонда изученных пород на уровень меди была довольно высокой и составила 0,64. Ранее было показано, что сила влияния генотипа быков-производителей на концентрацию Cu в мышцах потомков была равна 0,25. Следовательно, получены доказательства наследственной обусловленности уровня меди в мышечной ткани крупного рогатого скота, что дает возможность путем селекции оптимизировать уровень меди в организме.

Для сопоставления силы влияния генофонда с данными по наследуемости элементного статуса в других популяциях приведены литературные данные по коэффициентам наследуемости (h^2) концентраций микроэлементов в тканях сельскохозяйственных животных разных видов и пород (таблица 44).

Сравнительный анализ литературных данных свидетельствует о существенной межпородной дифференциации по элементному статусу, что подтверждает генетическую обусловленность аккумуляции микроэлементов в тканях сельскохозяйственных животных.

По результатам наших исследований, сила влияния фактора «порода» на содержание меди в мышечной ткани составила $\eta^2 = 0,64 \pm 0,03$ ($p < 0,001$), что сопоставимо с данными, полученными для герефордского скота ($\eta^2 = 0,58$ – $0,62$ по меди в печени и мышечной ткани) (Нарожных и др., 2021, 2025) и для голштинизированного черно-пёстрого скота ($\eta^2 = 0,51$ – $0,55$ для цинка и железа) (Игнатьева и др., 2024).

Коэффициенты наследуемости концентраций микроэлементов в тканях КРС варьируют в широких пределах в зависимости от вида животных, породы, типа ткани и элемента (таблица). Так, у скота породы ангус h^2 для железа в мышце *longissimus dorsi* составила $0,544 \pm 0,09$, тогда как для меди, марганца и кальция генетическая вариация не обнаружена ($h^2 \approx 0,00$) (Mateescu et al., 2013). Цинк и натрий характеризовались умеренной наследуемостью ($h^2 = 0,091$ и $0,187$ соответственно). У нелоре (*Bos indicus*)

наследуемость минерального состава мышц была оценена на уровне $h^2 = 0,29–0,36$ (Afonso et al., 2019), при этом для железа идентифицирован крупноэффектный QTL на BTA12, объясняющий 6,5 % аддитивной генетической дисперсии.

Таблица 44. Коэффициенты наследуемости (h^2) концентраций микроэлементов в тканях сельскохозяйственных животных разных видов и пород по литературным данным

Вид / порода	Ткань	Элемент	h ² ± SE	Источник
Angus (Bos taurus)	Мышцы	Fe	0,544 ± 0,09	Mateescu et al., 2013
		Zn	0,091 ± 0,04	
		Mn	0,009 ± 0,03	
Nelore (Bos indicus)	Мышцы	Все	0,29–0,36	Tizioto et al., 2015
Danish Holstein	Молоко	Ca	0,72 ± 0,05	Buitenhuis et al., 2015
		Zn	0,49 ± 0,06	
		Cu	0,15–0,25	
Danish Jersey		Ca	0,63 ± 0,06	
		Zn	0,57 ± 0,06	
German Landrace	Кровь	Ca	0,27 ± 0,07	Reyer et al., 2019

При сравнении с молочным скотом выявлены значительные межпородные различия в наследуемости минерального состава молока. У датских голштинов наибольшие значения h^2 установлены для кальция (0,72), цинка (0,49) и фосфора (0,46), тогда как у датских джерси — для кальция (0,63), цинка (0,57) и магния (0,57) (Buitenhuis et al., 2015). Медь характеризовалась промежуточной наследуемостью у голштинов и низкой — у джерси.

У свиней наследуемость минеральных параметров крови варьировала от умеренной до высокой: $h^2 = 0,42$ для неорганического фосфора, $h^2 = 0,27$ для кальция и $h^2 = 0,54$ для активности щелочной фосфатазы (Reyer et al., 2019). Полученные оценки сопоставимы с данными по наследуемости сывороточного фосфора ($h^2 = 0,58$) и кальция ($h^2 = 0,33$), полученными в исследованиях человека, что свидетельствует о консервативности механизмов минерального гомеостаза между видами млекопитающих.

Таким образом, совокупность литературных данных и результатов настоящего исследования демонстрирует, что концентрации микроэлементов в тканях сельскохозяйственных животных являются умеренно наследуемыми признаками ($h^2 = 0,27–0,72$), существенно варьирующимися в зависимости от вида, породы и типа ткани. Высокая доля фактора «порода» в вариации содержания меди ($\eta^2 = 0,64$), установленная в настоящем исследовании, согласуется с литературными данными и подтверждает возможность селекции на оптимизацию элементного статуса с учётом породной принадлежности.

Сохранение генетического разнообразия популяций крупного рогатого скота при интенсивной селекции представляет собой приоритетную задачу современного животноводства. По данным молекулярно-генетического анализа популяции голштинизированного черно-пестрого скота на территории Урала ($n = 15\,786$ особей, 15 микросателлитных локусов), за период 2010–2019 гг. наблюдалось снижение наблюдаемой гетерозиготности (H_o) с 0,75 до 0,72 и эффективного числа аллелей (A_{r15}) с 93,3 до 84,2. В то же время фиксационный индекс F_{ST} достоверно отличался от нуля ($p = 0,02$), что свидетельствует о дифференциации подпопуляций (Модоров и др., 2021). Полученные результаты согласуются с нашими данными о значительной доле влияния генофонда породы на элементный статус ($r_w = 0,64$) и подтверждают, что форсированный отбор по продуктивным качествам сопряжен с изменением структуры аллелофонда, что может косвенно влиять на метаболизм микроэлементов.

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

У быков черно-пестрой породы в возрасте 13-14 месяцев изучена частота соматической хромосомной нестабильности (СХН). Кариотипический статус является важнейшим интерьерным маркером генетического здоровья популяции и ее устойчивости к факторам среды (Зиновьева и др., 2019; Кочнева, 2017). Полученные данные можно принять за популяционную норму для быков 16-18-месячного возраста черно-пестрой породы в условиях Западной Сибири. Следует отметить, что в условиях отсутствия выраженного токсического пресса (концентрации элементов в компонентах среды ниже ПДК) выявленный уровень СХН отражает базовую генетическую стабильность генофонда (Петухов и др., 2001; Сысо и др., 2017a, 2017б; Petukhov et al., 2016a, 2016b, 2016c; Narozhnykh et al., 2016, 2017a, 2017b; Syso et al., 2017).

М. Л. Кочнева (2005) установила, что у быков-производителей красной степной, черно-пестрой и симментальской пород частота полиплоидии составляла соответственно были равны 7,75; 2,65 и 2,79 %.

По данным С. Г. Куликовой (1998), у коров черно-пестрой породы частота полиплоидии равна $9,7 \pm 0,46$ % (Куликова, 1998), что практически совпадает с нашими данными по быкам этой же породы. У молочного скота в условиях экологически чистых районов Западной Сибири частота полиплоидии находилась в пределах 2,7-9,7 %. Е. В. Камалдинов с соавторами (2010) выявил, что у скота серой украинской породы частота полиплоидии была значительно выше ($17,0 \pm 1,9$ %), чем у черно-пестрого скота. Выявленные межпородные различия подтверждают, что уровень СХН зависит от генетической конституции и истории селекции породы. Это, видимо, можно объяснить как породными различиями, так и процессом адаптации интродуцированного из Украины в Сибирь серого украинского скота.

Изучение аллелефонда отечественных пород крупного рогатого скота с использованием исторических образцов позволяет количественно оценить масштабы утраты генетического разнообразия в результате интенсивной селекции. Сравнительный анализ современных и исторических (зубы из краниологической коллекции) образцов ярославской и холмогорской пород по 9 микросателлитным маркерам показал, что аллельное разнообразие было выше у исторических образцов (6,09 и 7,03 аллелей на локус соответственно) по сравнению с современными популяциями (5,67 и 6,14), при этом у холмогорской породы выявлена наибольшая утрата генетического разнообразия (Абдельманова и др., 2020). Указанные данные согласуются с более высокой частотой хромосомных aberrаций у интродуцированных пород (серый украинский скот — до 17,0 % полиплоидии) по сравнению с аборигенными (Камалдинов и др., 2010) и подтверждают, что снижение генетического разнообразия коррелирует с ростом соматической хромосомной нестабильности.

Сравнительный анализ, проведенный Wojcik et al. (2019) на коровах четырёх пород, показал, что средняя частота сестринских хроматидных обменов составила $5,08 \pm 1,31$, а хромосомных фрагментаций — $3,45 \pm 0,94$ на клетку. Выявлены достоверные межпородные различия: минимальная частота обменов отмечена у аборигенной красной польской породы ($3,89 \pm 0,51$), максимальная — у высокопродуктивной польской чёрно-пёстрой ($6,03 \pm 0,63$), что указывает на более высокую геномную стабильность локальных пород по сравнению с интенсивно селекционируемыми линиями (Wojcik, Szostek, 2019).

Частота гиперплоидии у быков-производителей черно-пестрой породы составила $0,97 \pm 0,08$ %, что в 2,6 раза выше, чем у бычков в наших исследованиях (Кочнева, 2005). Однако у быков-производителей симментальской и красной степной пород была такая же частота гиперплоидии (соответственно 0,43 и 0,46) как и у бычков черно-пестрой породы. У коров черно-пестрой породы частота гиперплоидии составила 0,39

и 0,30 % (Куликова, 1998; Камалдинов и др., 2010). Такой же процент гиперплоидии (0,25 %) был отмечен у серого украинского скота (Камалдинов и др., 2010). Таким образом, значения гиперплоидии у крупного рогатого скота разных пород были приблизительно одинаковыми, за исключением быков-производителей черно-пестрой породы.

Несмотря на то, что механизмы генотоксического действия экотоксикантов изучены преимущественно в экспериментальной биологии, их влияние на соматическую хромосомную нестабильность у сельскохозяйственных животных в популяционном аспекте освещено недостаточно. В связи с этим в таблице 45 приведены достоверные средние по величине коэффициенты корреляции между концентрацией химических элементов и частотой некоторых показателей СХН.

Таблица 45 - Связь содержания тяжелых металлов в органах и тканях быков черно-пестрой породы с показателями соматической хромосомной нестабильности

Ткань, орган	Коррелирующие признаки	n	$r \pm Sr$	P
Печень	Cd – полиплоидия, %	24	$0,473 \pm 0,190$	0,020
	Cu – полиплоидия, %	24	$0,540 \pm 0,180$	0,006
	Cu – гипоплоидия, %	24	$0,362 \pm 0,170$	< 0,050
Мышечная ткань	Cu – полиплоидия, %	25	$0,384 \pm 0,170$	< 0,050
Волос	Fe – 3n триплоидия, %	25	$-0,398 \pm 0,170$	0,050
Сердце	Fe – гиперплоидия, %	25	$0,410 \pm 0,170$	0,050
	Cu – полиплоидия, %	25	$-0,320 \pm 0,200$	-
Легкие	Fe – диплоидность, %	25	$0,387 \pm 0,170$	< 0,050
Селезенка	Cd – полиплоидия, %	25	$0,511 \pm 0,150$	< 0,001
	Cu – гиперплоидия, %	25	$0,562 \pm 0,140$	< 0,001
	Mn – гиперплоидия, %	25	$0,534 \pm 0,140$	< 0,001

Почти одинаковые показатели были получены по частоте диплоидных клеток у бычков и коров черно-пестрой породы (82,8 и 84,6 %). По сравнению с ними у серого украинского скота диплоидность была ниже (76,8%). Это, видимо, связано с продолжающейся адаптацией этой породы к

условиям разведения в Сибири.

Установлено, что увеличение уровня Cd и Cu в печени ассоциировано 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.

Повышение концентрации железа в волосе ведет к уменьшению частоты триплоидии. Однако увеличение концентрации Fe в сердце и легких вызывает рост гиперплоидии и диплоидности. В последнем случае наблюдается положительная роль уровня меди в легочной ткани быков для нормализации частоты хромосомной соматической нестабильности. Из всех изученных металлов уровень Cd и Cu в органах и тканях в большей степени связан с повышением частоты хромосомных мутаций.

В исследованиях С. Г. Куликовой (2015) установлено увеличение частоты хромосомных aberrаций и разрывов в зонах с повышенным уровнем антропогенной нагрузки. Таким образом, различные аномалии и увеличение уровней некоторых тяжелых металлов в органах и тканях животных приводят к росту частоты соматической хромосомной нестабильности. М. Л. Кочнева (2005) также обнаружила увеличение процента полиплоидии и анеуплоидии у коров из зон техногенного загрязнения. У телят с различными типами аномалий наблюдали увеличение частоты aberrаций хромосом по сравнению со здоровыми (Куликова, 1998).

Таким образом, показано, что накопление тяжелых металлов в органах-мишенях ассоциировано с изменением частоты соматических хромосомных мутаций. Животные с низкой частотой хромосомной нестабильности на фоне повышенного уровня тяжелых металлов могут рассматриваться как более устойчивые к генотоксическому и метаболическому стрессу и представлять интерес в селекции. Кариотипический статус в комплексе с элементным профилем может быть использован как маркер генетического здоровья

популяций и дополнительный критерий отбора при формировании стад, устойчивых к факторам среды.

Результаты, представленные в разделе 3.5, получены нами лично и совместно с коллегами и опубликованы (Нарожных и др., 2015; Petukhov et al., 2016a; Narozhykh et al., 2017; Syso et al., 2017; Коновалова, 2018).

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. Поиск маркеров прижизненной диагностики аккумуляции тяжелых металлов в организме животных позволяет корректировать их уровень путем изменения рациона и позволяет оценивать генетическую предрасположенность животных к оптимальному минеральному гомеостазу (Нарожных и др., 2015; Tsygankova et al., 2017; Konovalova et al., 2017b). Подобный неинвазивный подход открывает возможности для выявления скрытых генетических резервов адаптивности и отбора животных, устойчивых к метаболическим нагрузкам (Фролов и др., 2025б).

Волосистой покров крупного рогатого скота является стабильным интерьерным маркером, ретроспективно отражающим генетически детерминированные особенности минерального обмена. В условиях стандартизированного содержания в Западной Сибири была изучена связь элементного состава волоса 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 (Таблица 46).

Таблица 46 - Способы прижизненного определения концентрации Pb в органах.

Пары элементов	$r \pm Sr$	p	$y = bx + a$
Патент № 2421726			
К волос – Pb печень	$0,81 \pm 0,06$	0,01	$0,0276x - 1,3619$
Cu волос – Pb селезенка	$0,52 \pm 0,14$	0,01	$0,0122x - 0,0571$
Патент № 2602915			
Mn волос – Pb легкие	$0,62 \pm 0,15$	0,01	$0,0179x - 0,0067$

У исследуемых животных содержание свинца в печени составило $0,64 \pm 0,25$ мг/кг. Выявленная фенотипическая изменчивость данного признака указывает на наличие и аддитивной генетической дисперсии, что делает его пригодным для селекционного улучшения. Наиболее информативным критерием для косвенной оценки концентрации Pb в печени оказалось содержание калия в волосе. Разработанные уравнения регрессии позволяют с высокой точностью прогнозировать уровень накопления элементов во внутренних органах по легкодоступным биосубстратам, что является основой для создания комплексных селекционных индексов.

В дальнейшем был исследован уровень свинца в легких. Концентрация этого элемента была выше, чем в мышцах, почках и селезенке, но ниже в 3,8 раза ($0,169$ мг/кг), чем в печени. По уровню свинца органы располагались в следующей последовательности: печень > легкие > селезенка в отношении $1,0 : 3,8 : 21,3$. Маркером уровня свинца в легких стала концентрация Mn в волосе. Между этими элементами в волосе и легких обнаружены положительные корреляции. Таким образом, разработанные биотехнологические алгоритмы позволяют прижизненно прогнозировать содержание свинца в печени, селезенке и легких у животных по концентрации меди, калия и марганца в волосе.

Следующим этапом исследования стала разработка прижизненных маркеров для оценки уровня кадмия в мышечной ткани (Таблица 47).

В качестве предиктора был использован уровень цинка в сыворотке

крови. Между этими параметрами установлена средняя отрицательная корреляция. С помощью уравнения регрессии возможна косвенная оценка уровня кадмия в мышцах по биохимическому профилю крови, что расширяет арсенал методов генетико-селекционного мониторинга. Эти исследования выполнены совместно с В. Л. Петуховым, О. С. Короткевич, А. И. Желтиковым и др. (Короткевич и др., 2011б; Патент № 2426119).

Таблица 47 - Методы определения кадмия в мышцах

Коррелирующие элементы	$r \pm Sr$	p	$y = bx + a$
Патент № 2426119			
Zn сыворотка – Cd мышца	$-0,468 \pm 0,167$	0,05	$-0,0000118x + 0,0233$

Разработанные биотехнологические подходы универсальны и применяются для оценки интерьерных признаков у других видов сельскохозяйственных животных. В частности, по содержанию марганца и меди в чешуе определяют уровень меди в мышечной ткани рыбы (патент № 2555518; Короткевич и др., 2015б). По содержанию Pb, Cd, Cu, Fe и Zn в щетине определяют уровни свинца в печени свиней (патент № 2285920; Петухов и др., 2006). Концентрацию Mn в копытном роге используют для определения Cd в мышечной ткани, сердце и печени (патент № 2342659; Петухов и др., 2008). 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, Петухов и др., 2010).

Таким образом, разработанные и запатентованные методы позволяют прижизненно использовать содержание ряда элементов в волосе, щетине, чешуе, копытном роге и сыворотке крови в качестве надежных биомаркеров для массового скрининга племенного поголовья и целенаправленного отбора животных с оптимальным, генетически обусловленным элементным гомеостазом.

Результаты, представленные в разделе 3.6, получены нами лично и совместно с коллегами и опубликованы (Короткевич и др., 2011а, 2011б; Коновалова и др., 2016а).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённое исследование впервые даёт комплексную характеристику элементного статуса крупного рогатого скота черно-пестрой породы в условиях Западной Сибири, охватывая семь органов и тканей, гематологический и биохимический профили, цитогенетические показатели, а также генетико-селекционные факторы, определяющие аккумуляцию меди у потомства. Полученные данные создают научную основу для использования элементного статуса в качестве интерьерного маркера в селекционных программах.

Тканеспецифичность элементного статуса как отражение генетической детерминации барьерно-накопительных функций. Установленные закономерности распределения эссенциальных элементов и экотоксикантов по органам и тканям демонстрируют выраженную тканеспецифичность, обусловленную генетически детерминированными различиями в экспрессии транспортных систем и металлосвязывающих белков. Максимальное депонирование меди в печени (8,99 мг/кг), цинка в волосе (96,41 мг/кг), железа в селезёнке (495,79 мг/кг) и марганца в почках (0,99 мг/кг) отражает функциональную специализацию органов-депо и может служить объективным индикатором фенофона породы. При этом убывающий ряд депонирования кадмия — почки > печень > мышцы > волос > селезёнка > лёгкие > сердце (60,0 : 31,5 : 26,8 : 8,8 : 7,5 : 6,8 : 1,0) — свидетельствует о существовании иерархии барьерных функций, имеющей генетическую основу. Фенотипическая изменчивость уровней кадмия и свинца (коэффициент вариации до 45–60 %) указывает на вероятную генетическую обусловленность части этой дисперсии, что делает данные признаки пригодными для селекционного улучшения.

Данные о тканеспецифичности распределения элементов согласуются с результатами исследований Нарожных (2019, 2020, 2021), проведённых на герефордском скоте в условиях Западной Сибири, где также установлена доминирующая роль печени в депонировании меди и волосяного покрова —

цинка. Сопоставимые закономерности отмечены Tizioto et al. (2015) для скота породы Nelore, где коэффициенты вариации содержания микроэлементов в мышечной ткани достигали 15–35 %, что подтверждает консервативность генетических механизмов регуляции минерального обмена в межпородном сравнении. Интегральная оценка через коэффициент аккумуляции (Rio) выявила, что печень (0,68) и волосы (0,54) обладают наибольшей депонирующей способностью, что подтверждает статус волосяного покрова как надёжного прокси-маркера для оценки общего минерального статуса животного. Полученные референсные значения и доверительные интервалы могут быть использованы при формировании популяционных норм интерьерных признаков для черно-пестрого скота в условиях Западной Сибири.

Сравнительный анализ с данными по другим популяциям (Oymak et al., 2017) подтверждает, что подобная функциональная специализация органов и тканей в метаболизме микроэлементов является консервативным генетическим признаком, не зависящим от экологических условий конкретного региона. Это обстоятельство имеет важное методологическое значение: референсные интервалы, разработанные для одной породы, не могут быть механически перенесены на другую без коррекции на генофонд (Мирошников et al., 2016; Фролов, 2021). Вместе с тем отсутствие превышения ПДК по кадмию и свинцу во всех изученных органах, за исключением свинца в сердце, свидетельствует о благоприятной экологической обстановке в регионе исследования и позволяет трактовать выявленную фенотипическую вариабельность как преимущественно генетически обусловленную, а не как результат токсической нагрузки (Syso et al., 2017a; Syso et al., 2017).

Биохимические маркеры как компоненты селекционных индексов. Гематологический и биохимический профили быков черно-пестрой породы находились в пределах физиологической нормы (за исключением незначительного превышения референсов по гемоглобину и цветному

показателю), что свидетельствует об удовлетворительном метаболическом гомеостазе и высокой адаптивной пластичности исследованной популяции. Установленная прямая корреляция между концентрацией свинца в селезёнке и цветным показателем крови ($r = 0,417$; $p < 0,05$) указывает на участие данного органа в процессах эритропоэза и метаболизма гемоглобина, что расширяет представления о функциональной роли селезёнки как гематологического депо. Аналогичные связи между элементным статусом и гематологическими показателями описаны у свиней (Reyer et al., 2019), где наследуемость фосфорно-кальциевого обмена в крови оценивалась в $h^2 = 0,27\text{--}0,54$, что указывает на генетическую обусловленность данной ассоциации.

Выявленные корреляции между элементным статусом органов и биохимическими показателями сыворотки крови имеют принципиальное значение для разработки косвенных методов оценки племенной ценности. Наиболее информативными являются: положительная корреляция кадмия в волосах с активностью щелочной фосфатазы ($r = 0,646$; $p < 0,001$) и отрицательная — с лактатдегидрогеназой ($r = -0,620$; $p < 0,01$), а также положительная связь меди в лёгких с глюкозой крови ($r = 0,412$; $p < 0,05$) и отрицательная связь цинка в лёгких с цветным показателем ($r = -0,452$; $p < 0,05$). Данные ассоциации отражают системные метаболические сдвиги, контролируемые общими генетическими механизмами, и формируют базу для включения биохимических прокси-маркеров в комплексные селекционные индексы. При этом ввиду множественности проведённых попарных тестов выявленные связи следует интерпретировать как гипотезообразующие; их верификация с применением процедур контроля FDR является предметом дальнейшего анализа.

Разнонаправленность корреляций одних и тех же элементов в разных органах представляет особый теоретический интерес. Так, между кадмием и медью в сердце и селезёнке выявлены положительные связи, тогда как в печени — отрицательная корреляция ($r = -0,874$; $p < 0,01$). Подобная

вариабельность доказывает, что минеральный обмен регулируется не глобальными факторами среды, а сложной системой тканеспецифичных генетических программ, что согласуется с данными Denholm et al. (2022) о плейотропном действии генов продуктивности на минеральный гомеостаз. Для обобщения таких многомерных данных в селекции применяются подходы нелинейного анализа главных компонент (Нарожных, 2019; Нохрин et al., 2024), позволяющие выявлять специфические метаболические паттерны, ассоциированные с высокой продуктивностью и адаптивностью.

Генетическая детерминация элементного статуса и перспективы селекции. Ключевым результатом исследования является доказательство наследственной обусловленности депонирования меди в органах и тканях потомства, определяемой генотипом быков-производителей. Установлено, что потомство быка Фабио характеризовалось повышенной предрасположенностью к накоплению меди в мышечной ткани (1,150 мг/кг), в то время как потомство Малстрема — в печени (49,4 мг/кг) и почках (4,33 мг/кг). Отсутствие единого паттерна аккумуляции меди во всех органах у одного производителя свидетельствует о тканеспецифичной генетической регуляции: устойчивость и восприимчивость к накоплению металлов в разных тканях контролируются различными, независимыми генетическими системами. Подобная гетерогенность аккумуляции описана у баранов романовской породы (Мингжун et al., 2019), где производители различались по способности влиять на накопление цинка в шерсти потомства на 60 %, а у свиней породы СМ-1 (Зайко et al., 2013а, 2013в, 2014) — по аккумуляции элементов в органах в зависимости от генофонда семейств.

Сила влияния генотипа отцов (rw) составила 0,48 для почек и 0,25 для мышечной ткани и печени ($p < 0,05$). Данные оценки указывают на умеренную генетическую обусловленность признака и создают предпосылки для эффективного прямого отбора. Сравнительный анализ с литературными данными показывает, что полученные оценки сопоставимы с данными Tizioto et al. (2015) для скота породы Nelore ($h^2 = 0,30$ для Cu в мышцах) и Mateescu

et al. (2013) для ангусов ($h^2 = 0,48 \pm 0,08$ для Cu в *longissimus dorsi*), однако ниже, чем у датских голштинов для цинка в молоке ($h^2 = 0,49 \pm 0,06$; Buitenhuis et al., 2015). Различия в оценках наследуемости между популяциями отражают специфику генофонда и историю селекции, что подтверждает необходимость получения породоспецифичных данных. Почечная ткань является наиболее информативным биомаркером для оценки племенной ценности быков-производителей по признакам минерального гомеостаза.

Выявленное влияние породной принадлежности на концентрацию меди в мышечной ткани (черно-пестрая — 1,76 мг/кг; голштинская — 0,97 мг/кг; герефордская — 1,03 мг/кг; $rw = 0,64$; $p < 0,001$) подтверждает существование значительного генетического разнообразия по элементному статусу между породами. Наибольший уровень меди у черно-пестрой породы (на 80 % выше голштинской) свидетельствует о специфических особенностях метаболизма данной породы, ассоциированных с историей селекции в условиях Западной Сибири. Нарожных et al. (2021, 2025) установили для герефордского скота силу влияния породного фактора на содержание меди в печени и мышечной ткани на уровне $\eta^2 = 0,58\text{--}0,62$, что близко к нашим данным. Различия в аккумуляции микроэлементов между породами могут быть обусловлены меньшей мышечной массой и более высокой метаболической активностью печени у животных молочного направления по сравнению с мясными породами (Pereira et al., 2018). Полученные данные обосновывают необходимость разработки породоспецифичных референсных интервалов и включения элементных маркеров в комплексные селекционные программы с учётом породной принадлежности.

Актуальным направлением является поиск ассоциаций полиморфизма генов-кандидатов (металлотионеины, транспортёры Fe, Cu, Zn) с межпородными различиями в элементном статусе. Применение технологий полногеномного ассоциативного поиска (GWAS) открывает перспективы для разработки ДНК-тест-систем раннего отбора животных, устойчивых к

накоплению поллютантов (Донник et al., 2023). В то время как для традиционных признаков продуктивности сложные алгоритмы отбора SNP-маркеров уже успешно применяются (Кощев, Аврахам, 2025), для интерьерных признаков, связанных с минеральным обменом, методологическая база только формируется. Полученные в настоящем исследовании оценки силы влияния генотипа и породоспецифичности создают необходимый фенотипический фундамент для последующих геномных исследований.

Цитогенетические маркеры генетического здоровья популяций. Установленные ассоциации между уровнем тяжёлых металлов в органах и частотой соматической хромосомной нестабильности открывают возможности использования кариотипического статуса в комплексе с элементным профилем для оценки генетического здоровья популяций. Положительные корреляции кадмия в печени с полиплоидией ($r = 0,473$; $p < 0,020$), меди в печени с полиплоидией ($r = 0,540$; $p < 0,006$) и гипоплоидией ($r = 0,362$; $p < 0,05$), а также меди в селезёнке с гиперплоидией ($r = 0,562$; $p < 0,001$) свидетельствуют о генотоксическом действии поллютантов на уровне соматических клеток. При этом положительная корреляция содержания железа в лёгких с частотой диплоидных клеток ($r = 0,387$; $p < 0,05$) указывает на роль данного элемента в поддержании геномной стабильности.

Сравнительный анализ с данными других исследователей показывает, что выявленный уровень СХН у черно-пестрых быков (частота полиплоидии $9,7 \pm 0,46$ %) практически совпадает с данными Куликовой (1998) для коров той же породы и находится в пределах 2,7–9,7 %, характерных для молочного скота в экологически чистых районах Западной Сибири (Кочнева, 2005). В то же время у серого украинского скота, интродуцированного в Сибирь, частота полиплоидии достигала $17,0 \pm 1,9$ % (Камалдинов et al., 2010), что значительно выше и свидетельствует о связи соматической хромосомной нестабильности с процессами адаптации интродуцентов. Wojcik и Szostek (2019) выявили достоверные межпородные различия по частоте сестринских

хроматидных обменов: минимальная частота отмечена у аборигенной красной польской породы ($3,89 \pm 0,51$), максимальная — у высокопродуктивной польской чёрно-пёстрой ($6,03 \pm 0,63$), что указывает на более высокую геномную стабильность локальных пород по сравнению с интенсивно селекционируемыми линиями. Абдельманова et al. (2020) показали, что аллельное разнообразие по микросателлитным маркерам было выше у исторических образцов ярославской и холмогорской пород (6,09 и 7,03 аллеля на локус) по сравнению с современными популяциями (5,67 и 6,14), что свидетельствует об утрате генетического разнообразия в результате интенсивной селекции. Наши данные о значительной доле влияния генофонда породы на элементный статус ($rw = 0,64$) согласуются с результатами Модорова et al. (2021), установившими снижение наблюдаемой гетерозиготности у голштинизированного черно-пестрого скота на Урале с 0,75 до 0,72 за период 2010–2019 гг., и подтверждают, что форсированный отбор по продуктивным качествам сопряжён с изменением структуры аллелофонда, что может косвенно влиять на метаболизм микроэлементов (Сермягин et al., 2020).

Таким образом, комплекс элементного профиля и кариотипического статуса позволяет проводить многоуровневую оценку генетического здоровья популяций. Животные с низкой частотой хромосомной нестабильности на фоне повышенного уровня тяжёлых металлов могут рассматриваться как более устойчивые к генотоксическому стрессу и представлять селекционный интерес, особенно в условиях биогеохимических провинций с повышенной техногенной нагрузкой (Скальный et al., 2009; Manisalidis et al., 2020).

Биотехнологические подходы прижизненной диагностики. Разработанные и запатентованные методы неинвазивной оценки содержания свинца и кадмия в органах-депо по элементному составу волоса и сыворотки крови (патенты № 2421726, № 2602915, № 2426119) создают технологическую базу для массового скрининга племенного поголовья.

Высокие коэффициенты корреляции между маркерами (K, Cu, Mn в волосе; Zn в сыворотке) и содержанием токсикантов в паренхиматозных органах ($r = 0,52-0,81$) обеспечивают достаточную точность прогноза для селекционной практики. Данные подходы позволяют оценивать генетическую предрасположенность животных к оптимальному минеральному гомеостазу без применения методов, требующих забоя, что критически важно для сохранения генетического разнообразия племенного поголовья.

Концептуальная основа использования производных кожи в качестве биомаркеров минерального обмена разработана в исследованиях В.Л. Петухова, К.Н. Нарожных, О.С. Короткевича и их коллег (Петухов et al., 2005, 2007; Короткевич et al., 2011a, 2011b, 2015a, 2015b; Коновалова, 2015; Мирошников et al., 2021). Установлено, что элементный состав волос интегрирует информацию о минеральном обмене за период роста, поскольку включённые в кератиновую структуру элементы остаются неизменными (Beernaert et al., 2007; McLean et al., 2009). Эта особенность делает волосяной покров идеальным неинвазивным биомаркером для массового скрининга в селекционной практике, позволяя оценивать генетически обусловленные особенности минерального обмена без стрессового воздействия на животное (Мирошников et al., 2016; Завьялов, 2020; Фролов, 2021).

Разработанные биотехнологические подходы универсальны и применяются для оценки интерьерных признаков у других видов сельскохозяйственных животных. В частности, по содержанию марганца и меди в чешуе определяют уровень меди в мышечной ткани рыбы (патент № 2555518; Короткевич et al., 2015b), по содержанию Pb, Cd, Cu, Fe и Zn в щетине — уровни свинца в печени свиней (патент № 2285920; Петухов et al., 2006), а концентрацию Mn в копытном роге используют для определения Cd в мышечной ткани, сердце и печени (патент № 2342659; Петухов et al., 2008). 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 et al., 2017; Петухов et al., 2010). Дальнейшее развитие данного направления связано с созданием простых линейных моделей и индексов для прогноза племенной ценности быков-производителей по признакам минерального обмена и адаптивности (Калашников et al., 2020; Петухов et al., 2025).

Таким образом, результаты исследования создают научную основу для включения элементных маркеров в селекционные программы крупного рогатого скота. Установленные значения силы влияния генотипа ($r_w = 0,25–0,48$) обосновывают возможность прямого отбора по эссенциальным элементам и устойчивости к экотоксикантам. Разработанные патентованные способы прижизненной диагностики обеспечивают технологическую реализацию данного подхода в племенных хозяйствах Западной Сибири.

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 – $7,67 \pm 0,60 \times 10^9/л$, гемоглобина – $130,30 \pm 3,34$ г/л, СОЭ – $0,66 \pm 0,07$ 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 эритропоэза 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 мг/кг; голштинская — 0,97 мг/кг; герефордская — 1,03 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

Установленные 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 в качестве диагностических ориентиров при ветеринарно-санитарной экспертизе и экологической оценке мясной продукции в соответствии с требованиями ТР ТС 034/2013 «О безопасности мяса и мясной продукции».

Разработанные неинвазивные методы прижизненной оценки содержания тяжелых металлов в органах (по элементному составу волоса и биомаркерам в сыворотке крови) могут быть рекомендованы для мониторинга состояния животных (№ 2421726, № 2602915, № 2426119).

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.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдельманова, А.С. Сравнительный анализ аллелофонда современных и исторических образцов ярославской и холмогорской пород крупного рогатого скота по микросателлитам / А.С. Абдельманова, А.И. Мишина, В.В. Волкова, А.В. Доцев, А.А. Сермягин, Р.Ю. Чинаров, О.И. Боронецкая, Л.В. Петрикеева, Г. Брем, Н.А. Зиновьева // Агробиология. – 2020. – № 20. – С. 87-88.
2. Абилов, А. И. Биоэлементное состояние первотёлок в зависимости от срока послеотельного периода / А. И. Абилов, А. В. Устименко, И. П. Новгородова [и др.] // Ветеринария. — 2024. — № 1. — С. 31–36.
3. Абилов, А. И. Минеральный обмен у быков-производителей молочных пород после длительного зимнего периода эксплуатации / А. И. Абилов, М. И. Дунин, Н. В. Боголюбова [и др.]// Зоотехния. — 2021. — № 2. — С. 20–25.
4. Абилов А. И. Биоэлементное состояние быков-производителей холмогорской породы в разных природно-климатических условиях Российской Федерации / А. И. Абилов, Г. А. Андреев, Т. П. Усова // Вестник биотехнологии. – 2023. – № 4 (37). – С. 49-58.
5. Абилов, А. И. Минеральный обмен у быков-производителей в условиях Ленинградской области / А. И. Абилов, А. П. Ивасюк, И. П. Новгородова // Аграрная наука. – 2021. – № 5. – С. 30-35.
6. Авцын, А. П. Микроэлементы человека: этиология, классификация, органопатология / А. П. Авцын, А. А. Жаворонков, М. Р. Риш, Л. С. Строчкова. – М.: Медицина, 1991. – 496 с.
7. Агаджанян, Н. А. Химические элементы в среде обитания и экологический портрет человека/ Н. А. Агаджанян, А. В. Скальный// М.: КМК, 2001. – 83 с.
8. Адушинов, Д. С. Развитие молодняка породы сибирячка / Д. С. Адушинов, А. Н. Коптилов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового

- питания. – 2025. – № 1. – С. 152-157.
9. Азаубаева, Г. С. Картина крови у животных и птиц / Г.С. Азаубаева. – Курган: Зауралье, 2004. – 168 с.
 - 10.Амерханов, Х. А. Сохранение генетического разнообразия крупного рогатого скота — основа успешного развития животноводства / Х. А. Амерханов, Г. С. Шеховцев, Е. М. Колдаева, И. П. Прохоров // Молочное и мясное скотоводство. — 2023. — № 1. — С. 3–6.
 - 11.Амерханов, Х. А. Роль и место животноводства в обеспечении продовольственной безопасности России / Х. А. Амерханов // Молочное и мясное скотоводство. – 2024. – № 4. – С. 3-6.
 - 12.Амерханов, Х. А. Отечественное овцеводство, породные и региональные особенности / Х. А. Амерханов, К. Э. Разумеев, Ю. А. Юлдашбаев [и др.] // Зоотехния. – 2025. – № 11. – С. 25-31.
 - 13.Алиджанова, И. Э. Влияние стрессорных факторов различной природы на накопление химических элементов в теле лабораторных животных / И.Э. Алиджанова, С. В. Нотова, Е.В. Кияева // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – №12 (118). – С. 18–21.
 - 14.Алмабаев, Ы. А. Морфология коры полушарий большого мозга при экзотоксикозе хлористым кадмием / Ы.А. Алмабаев, А.К. Жаксылыкова, Н.Л. Ткаченко [и др.]// Наука и мир. – 2014. –3(3). – С. 117–119.
 - 15.Аскарова, А. Е. Свинец – индуцированные патологические состояния (обзор литературы) / А. Е. Аскарова, А. Н. Нурмухамбетов // Вестник Казахского Национального медицинского университета. – 2013. – № 3 (2). – С. 54– 58.
 - 16.Басонов О. А. Молочная продуктивность коров-первотелок голштинской породы в зависимости от подбора родительских пар / О. А. Басонов, А. С. Кулаткова, Н. П. Шкилев // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2024. – № 4 (79). – С. 108-112.

17. Басонов, О. А. Влияние генотипа голштинских быков-производителей различной селекции на продуктивные показатели черно –пестрого скота / О. А. Басонов, А. В. Колесникова// Зоотехния. – 2016. – № 5. – С. 2–3.
18. Бакай, А. В. Кариотипическая изменчивость у крупного рогатого скота и ее использование в селекции: дис. ... д-ра с.-х. наук / А. В. Бакай. – Москва, 1995. – 267 с.
19. Бекенев, В.А. Продуктивное долголетие животных, способы его прогнозирования и продления /В.А. Бекенев// Сельскохозяйственная биология. – 2019. – Т.54.– №4. – С.655-666.
20. Биохимия / Под ред. Е.С. Северина. – М.: ГЭОТАР –Медиа, 2006. – 784с.
21. Боев, В. М. Химические канцерогены среды обитания и злокачественные новообразования: монография / В. М. Боев [и др.]. – Москва: Медицина, 2002. – 344 с. – ISBN 5-225-04144-X.
22. Васильева, Л. А. Статистические методы в биологии, медицине и сельском хозяйстве / Л.А. Васильева. – Новосибирск: ИЦиГ СО РАН, 2007. – 127 с.
23. Васильева, С. В Клиническая биохимия крупного рогатого скота / С.В. Васильева, Ю.В. Конопатов. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 188 с.
24. Волкова, В. В. Микросателлитные профили быков-производителей черно-пестрой и голштинской породы : свидетельство о регистрации базы данных № 2024624683 / В. В. Волкова, Е. А. Гладырь, И. С. Недашковский [и др.] ; заявл. 02.10.2024; опубл. 24.10.2024.
25. Гамарник, Н. Г. Герефордский скот сибирской селекции / Н.Г. Гамарник, О.М. Шевелева, А.С. Дуров. – Новосибирск: Рос. акад. С.-х. наук, 2012. – 309 с.
26. Георгиевский, В. И. Минеральное питание животных / В.И. Георгиевский, Б.Н. Анненков, В.Т. Самохин. – М.: – Колос, 1979. –

471с.

27. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078 –01. – Москва: ФГУП «ИнтерСЭН», 2002.
28. Глазко, В. И. Молекулярная биология для животноводства / В. И. Глазко // Farm animal. – 2012. – № 1. – С. 24 –29.
29. ГОСТ 30178-96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов: межгосударственный стандарт: введен в действие Постановлением Госстандарта РФ от 01.07.1998 № 21-ст. – Москва: Стандартинформ, 1998. – 11 с.
30. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки почв для химического, бактериологического и гельминтологического анализа. Постановление Госкомитета СССР по стандартам от 19.12.1984, № 4731. – М.: Стандарт информ, 2008. – 8 с.
31. ГОСТ 17.4.3.06–86. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. – Взамен ГОСТ 17.4.3.06–86; введ. 01.07.1987. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 4 с.
32. ГН 2.1.7. 2511–09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. – Москва, 2009. – Режим доступа: <http://www.complexdoc.ru>, свободный (дата обращения: 02.04.2018).
33. Горелик, Л. Ш. Мясная продуктивность бычков разных пород / Л. Ш. Горелик, О. В. Горелик, М. Б. Ребезов // Молодой ученый. — 2014. — № 10 (69). — С. 117–119.
34. Горелик, А. С. Молочная продуктивность коров-дочерей голштинских бычков-производителей / А. С. Горелик, О. В. Горелик, М. Б. Ребезов, С. Ю. Харлап // Аграрная наука. — 2025а. — № 7. — С. 85–91.
35. Горелик, А. С. Анализ причин выбраковки коров голштинской породы

- в зависимости от генетических факторов / А. С. Горелик, О. В. Горелик, М. Б. Ребезов, С. Ю. Харлап // Аграрная наука. — 20256. — № 6. — С. 67–72.
36. Грачева, О.Г. Аккумуляция антропогенных загрязнителей (свинца и кадмия) в организме цыплят-бройлеров на фоне применения рациона с повышенным содержанием витамина D3: дисс. ... канд. биол. наук. — Красноярск, 2009. — 124 с.
37. Грикшас, С.А. Продуктивность бычков черно-пестрой, герефордской и абердин —ангусской пород в условиях Центральной Нечерноземной зоны РФ / С.А. Грикшас, М.М. Шамидова, М.Р. Аббасов // Известие С.-Петербургский гос.агр.ун-т. —2016. — №42. —С. 116–121.
38. Гржибовский, А. М. Корреляционный анализ данных с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS / А. М. Гржибовский, С. В. Иванов, М. А. Горбатова // Название журнала. — 2017. — № 1. — С. 7-36.
39. Громова, О. А. Клиническая фармакология взаимодействий цинка и железа / О. А. Громова, И. Ю. Торшин, И. К. Томилова // Лечебное дело. — 2010. — № 1. — С. 31 – 42.
40. Громыко, Е.В. Оценка состояния организма коров методом биохимии / Е.В. Громыко // Экологический вестник Кавказа. — 2005. —№2. — С. 80–94.
41. Гудилин, И.И. Кемеровская порода свиней / И.И. Гудилин, В.Н. Дементьев [и др.] Новосибирск: Ред.-полиграф об-ние СО РАСХН, 2003. — 388 с.
42. Гудилин, И.И. Интерьер и продуктивность свиней/ И.И. Гудилин, В.Л. Петухов, Т.А. Дементьева. — Новосибирск: НГАУ, 2000. — 251 с.
43. Давыдова, С.Л. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века / С.Л. Давыдова, В.И. Тагасов. — М.: Изд -во РУДН, 2002. — 140 с.
44. Данилова, Н.С. Физико-химические и биохимические основы производства мяса и мясных продуктов. — М.: КолосС, 2008. — 280 с.
45. Данкверт, С.А. Скотоводство стран мира / С.А. Данкверт, А.М.

- Холманов, О.Ю. Осадчая. – М., 2007. – 608 с.
46. Дегтярев, А. П. Коэффициенты биологического накопления как основа биохимической классификации химических элементов / А. П. Дегтярев // Биосфера. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 5-19. – DOI: 10.24855/biosfera.v16i1.882
 47. Демидович, А. П. Диагностическое значение биохимических показателей крови (белковый, углеводный, липидный обмен): учеб.-метод. пособие для студентов по специальности 1 – 74 03 02 «Ветеринарная медицина» / А. П. Демидович. – стереотип. изд. – Витебск: ВГАВМ, 2019 – 34 с.
 48. Джаксыбаева, Г. Г. Полиморфные варианты гена P1T-1 крупного рогатого скота симментальской и красной степной пород Республики Казахстан / Г. Г. Джаксыбаева, Н. Н. Кочнев, Н. Н. Кайниденов // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2023. – № 3 (68). – С. 167-175. – DOI 10.31677/2072-6724-2023-68-3-167-175.
 49. Добровольский, Ю.Н. Сезонные колебания биохимических и гематологических показателей крови голштинского скота черно-пестрой породы / Ю.Н. Добровольский, Н. Е. Добровольская // Евразийский союз ученых. – 2014. – №8 –10. – С.76 – 77.
 50. Донник, И. М. Экология и здоровье животных: монография / И. М. Донник, П. Н. Смирнов; Уральская государственная сельскохозяйственная академия. – Екатеринбург: УрГСХА, 2001. – 330 с. – ISBN 5-87203-109-1.
 51. Донник, И.М. Биологические особенности и мясная продуктивность быков черно-пестрой, абердин-ангусской и герефордской пород / И.М. Донник, М.М. Шамидова, С.А. Грикшас [и др.]// Аграрный вестник Урала. – №6 (136). – 2015. – С. 47–50.
 52. Донник, И. М. Подходы к редактированию генома сельскохозяйственных животных / И. М. Донник, В. А. Макутина, А. С.

- Кривоногова, А. Г. Исаева, А. В. Дейкин, А. Г. Кощев // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. — 2023. — Т. 53, № 9. — С. 101–110.
53. Донченко, А.С. Приоритетные направления фундаментальных исследований и проекты «полного цикла» для АПК Сибири в рамках реализации стратегии научно-технического развития Российской Федерации / А.С. Донченко // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2018. – Т.48. – 1. – С. 5–9.
54. Драганов, И. Ф. Кормление животных / И. Ф. Драганов, Н. Г. Макарец, В. В. Калашников. – Изд. 2 –е, испр. и доп. – М.: Изд-во РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2011. – Т. 2. – 565 с.
55. Дунин, М. И. Биотехнологические и селекционные аспекты воспроизводства генофондных и племенных породных ресурсов молочного скота в Российской Федерации: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 4.2.5 / Дунин Михаил Иванович. – Москва, 2025. – 44 с.
56. Дунин, И.М. Отечественное животноводство на пороге третьего десятилетия XXI/ И.М. Дунин, Е.С. Суслина, В.К. Аджибеков// Зоотехния. – 2021а. –№1. – С. 7-10.
57. Дунин, И.М. Породная и генетическо-селекционная база отечественного животноводства/ И.М. Дунин, М.И. Дунин, В.К. Аджибеков// Зоотехния. – 2021б. – №1. – С. 2-6.
58. Дускаев, Г. К. Влияние тяжёлых металлов на организм животных и окружающую среду обитания / Г. К. Дускаев, С. А. Мирошников, Е. А. Сизова [и др.] // Вестник мясного скотоводства, 2014. – № 3 (86). – С. 7 – 11.
59. Ерохин А. И. Овцеводство : учебник / А. И. Ерохин, С. А. Ерохин. – Москва : МГУП, 2004. – 480 с. – ISBN 5-8122-0780-1.
60. Ершов, Ю. А. Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов в 2 кн. Книга 1: учебник для вузов / Ю. А. Ершов, В. А. Попков, А. С. Берлянд. – 10-е изд., испр. и доп. – Москва:

- Издательство Юрайт, 2020. – 215 с. – (Высшее образование). – ISBN 978 –5 –9916 –8659 –4. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/452203> (дата обращения: 06.01.2022).
61. Желтикова, О.А. Аккумуляция макро- и микроэлементов в печени свиней скороспелой мясной породы/ О.А. Желтикова // Вестник НГАУ. – 2007. – № 6. – С. 50–56.
 62. Желтиков, А.И. Черно-пестрый скот Сибири / А.И. Желтиков, В.Л. Петухов, О.С. Короткевич [и др.]. – Новосибирск: НГАУ, 2010. – 500с.
 63. Жигачев, А. И. Цитогенетический анализ в популяциях крупного рогатого скота. Сообщ. 1. Распространение транслокации 1/29 хромосом в отдельной популяции / А. И. Жигачев, Н. С. Никитин, В. В. Черкасов // Генетика. – 1984. – Т. 20. – № 8. – С. 1360.
 64. Жучаев, К.В. Физиологический статус лактирующих голштинских коров в условиях Сибири / К.В.Жучаев, М.Л. Кочнева, Е.А. Борисенко [и др.] //Вестник НГАУ. – 2016. – №4(41). – С.118–124.
 - 65.Завьялов, О. А. Разработка технологии повышения продуктивности молочного скота путём оценки и коррекции элементного статуса: диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук: 06.02.10 / Завьялов Олег Александрович; Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН. — Оренбург, 2020. — 280 с.
 - 66.Зайко, О.А. Влияние генофонда семейств скороспелой мясной породы на аккумуляцию свинца в некоторых органах и тканях свиней/ О.А. Зайко, Т.В. Коновалова// Мир науки, культуры, образования. – 2013а. – №4 (41). – С. 432 – 434.
 - 67.Зайко, О.А. Особенности аккумуляции макро- и микроэлементов в миокарде свиней скороспелой мясной породы / О.А. Зайко, О.С. Короткевич, В.Л. Петухов // Главный зоотехник. – 2013б. –№6. – С. 35–40.

- 68.Зайко, О.А. Характеристика генофонда линий породы свиней СМ –1 по аккумуляции свинца в некоторых органах и тканях свиней / О.А. Зайко, Т.В. Коновалова// Зоотехния. – 2013в. – №8. – С. 11 – 12.
- 69.Зайко, О.А. Изменчивость и корреляция химических элементов в органах и тканях свиней скороспелой мясной породы СМ –1: дис. ... канд. биол. наук. / Новосиб. гос. аграр. ун-т; Зайко Ольга Александровна. – Новосибирск, 2014. – 182 с. – Библиогр.: С. 132 – 173.
- 70.Зайко, О. А. Аккумуляция химических элементов в производных кожи свиней породы СМ-1, их влияние на гематологический и биохимический статус животных / О. А. Зайко, О. И. Себежко, К. Н. Нарожных // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии : сборник научных докладов XX Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2017. – С. 351-356.
- 71.Зайко, О.А. Содержание марганца в некоторых органах и тканях свиней породы Ландрас / О.А. Зайко, Е.И. Тарасенко // Вестник НГАУ. – 2022. – Т. 64, № 3. – С. 102-110.
- 72.Зайчик, В.Е. Медицинская и биологическая элементология как новые научные дисциплины: состояние и перспективы / В.Е. Зайчик //Международная молодежная школа-семинар «Геохимия живого вещества». – (2 –3 июня 2013); Томский политехнический ун-т. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 76–82.
- 73.Зиновьева, Н.А. Генетические ресурсы животных: развитие исследований аллелофонда пород крупного рогатого скота / Н.А. Зиновьева, А.А. Сермягин, А.В. Доцев [и др.] // Сельскохозяйственная биология. – 2019. – Т.54, №4. – С. 631–641.
- 74.Игнатьева, Л. П. Результаты анализа полногеномных ассоциаций с метаболическими биомаркерами в молоке коров голштинской породы / Л. П. Игнатьева, А. А. Сермягин, И. А. Лашнева [и др.] // Молочное и

- мясное скотоводство. – 2024. – № 1. – С. 10-16.
- 75.Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, – 2012. – С. 220.
- 76.Ильин, В.Б. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области / В.Б. Ильин, А.И. Сысо. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
- 77.Илларионова, Е.А. Химико-токсикологический анализ тяжелых металлов / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский; ГФБОУ ВО ИГМУ Минздрав России, кафедра фармацевтической и токсикологической химии. – Иркутск: ИГМУ, 2016. – 58 с.
- 78.Исаева, А. Г. Потенциал продуктивного долголетия коров в зависимости от породной принадлежности / А. Г. Исаева, Ч. Р. Юсупова, О. В. Соколова, В. Д. Зубарева, М. В. Бытов, В. А. Макутина // Труды Кубанского государственного аграрного университета. — 2025. — № 118. — С. 304–310.
- 79.Казаровец, Н. В. Белорусская популяция черно-пестрого скота: история формирования, направления совершенствования: монография / Н. В. Казаровец, И. П. Шейко, Т. В. Павлова; Витебская государственная академия ветеринарной медицины. – Витебск: ВГАВМ, 2023. – 207 с. – ISBN 978-985-591-171-6.
- 80.Калашников, В.В. Содержание макро- и микроэлементов в конском волосе как характеристика элементного статуса лошадей заводских и локальных пород в разных регионах России / В.В. Калашников, В.А. Багиров, А.М. Зайцев [и др.]//Сельскохозяйственная биология. – 2017. – том 52. – №6. – С. 1234–1243.
- 81.Калашников, А. Е. Составление простых линейных моделей для прогноза племенной ценности животных / А. Е. Калашников, J. Pribyl, А. А. Кочетков, Т. М. Ахметов, Р. Р. Шайдуллин, Е. Г. Бойко, Л. А. Калашникова, А. А. Новиков // Молочное и мясное скотоводство. — 2020. — № 4. — С. 13–16.

82. Калетина, Н.И. Токсикологическая химия. Метаболизм и анализ токсикантов / Под ред. Н.И. Калетиной. – М.: ГЭОТАР – Медиа, 2008. – 1016 с.
83. Камалдинов, Е. В. Антигенный статус и хромосомная нестабильность серого украинского скота / Е. В. Камалдинов, А. В. Кушнир, В. Л. Петухов, О. С. Короткевич // Сибирский вестник сельского хозяйства. – 2010. – № 12. – С. 67-73.
84. Камалдинов, Е.В. Методы обработки экспериментальных данных и математического моделирования процессов: учебное пособие, 2-е изд., доп./ сост.: Е.В. Камалдинов, С.Г. Куликова, М.Л. Кочнева; Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск, 2016. – 141 с.
85. Камалдинов, Е.В. Каноническая дискриминантная модель влияния генотипа отца на некоторые интерьерные показатели его потомков у свиней / Е.В. Камалдинов // Вестник Красноярского гос. агр. ун-та. – 2012. – №1. – С 117–122.
86. Кашин, А.С. Антропогенно-экологические органопатологии молодняка животных. Профилактика и терапия / А.С. Кашин. – Барнаул: ВНИИПО СО РАН, 2002. – 250 с.
87. Коваленок Ю. К. Патент № 2451926 Российская Федерация, МПК G01N 1/34. Способ подготовки проб волос крупного рогатого скота к исследованию на макро- и микроэлементный состав / Ю. К. Коваленок, А. П. Курдеко, А. В. Богомольцев, Е. И. Совейко ; заявитель и патентообладатель Ковалёнок Юрий Казимирович (BY), УО «Витебская ордена "Знак Почета" государственная академия ветеринарной медицины» (BY). — № 2010152634/05; заявл. 23.12.2010; опубл. 27.05.2012 // Бюллетень. — 2012. — № 15. — 7 с.: ил.
88. Колесникова, Л. И. Гены ферментов антиоксидантной системы / Л. И. Колесникова, Т. А. Баирова, О. А. Первушина // Вестник Российской академии медицинских наук. – 2013. – № 12. – С. 83 –88.
89. Колесникова, А. В. Степень использования генетического потенциала

- голштинских быков-производителей различной селекции / А. В. Колесникова, О. А. Басонов // Зоотехния. – 2017. – № 1. – С. 10-12.
90. Комиссарова, Л.Н. Разработка спектральных методов анализа волосяного покрова животных/ Л.Н. Комиссарова, Т.В. Коновалова, А.И. Сапрыкин // Тезисы докл. XIII межд. науч. –техн. конф.: Современные проблемы экологии. – Тула – 2015. – С 49 – 53.
91. Коневалова, Н.Ю. Биохимия / Н.Ю. Коневалова, И.Н. Гребенников, С.П. Козловская и др. // Под.ред. Н.Ю. Коневаловой. – Витебск: ВГМУ, 2017. – 690 с.
92. Коновалова, Т.В. Изменчивость и взаимосвязи макроэлементов в печени крупного рогатого скота черно-пестрой породы/ Т.В. Коновалова, М.В. Стрижкова, О.С. Короткевич// Научный журнал ISSN 2070 –7428.–2014. – №5. – С. 743.
93. 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.
94. Коновалова Т. В. Патент № 2602915 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения концентрации свинца в легких крупного рогатого скота / Т. В. Коновалова, О. С. Короткевич, К. Н. Нарожных [и др.]. — № 2015130994/15; заявл. 24.07.2015; опубл. 27.10.2016 // Бюллетень. — 2016а. — № 30.
95. Коновалова, Т.В. Характеристика интерьера и экологическое нормирование содержания тяжелых металлов в почках черно-пестрого скота/ Т.В. Коновалова //Главный зоотехник. – 2016б. –№ 7. –С. 48 –53.
96. Коновалова, Т.В. Аккумуляция экотоксикантов в паренхиматозных органах быков черно-пестрой породы Западной Сибири// В сб.: Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии. Сб. науч. докл. XX Межд. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2017. –С. 376–379.

97. 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: Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2018. – С. 28-30.
98. Коновалова, Т.В. Влияние генотипа быков-производителей голштинской породы на аккумуляцию железа в волосе потомков / Т.В. Коновалова, Ю.И. Федяев // В сб.: Теория и практика современной аграрной науки. Сборник II Национальной (всероссийской) конференции. – 2019. – С. 295– 297.
99. 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.
100. 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.
101. Коновалова Т.В. Влияние генотипа отцов на содержание меди в печени потомков у крупного рогатого скота / Т.В. Коновалова // Вестник НГАУ. — 2024а. — №1 (70). — С.196-203.
102. Коновалова Т.В. Содержание, изменчивость и корреляции тяжелых металлов в органах и тканях овец романовской породы / Т.В. Коновалова, А.С. Донченко // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. — 2024б. — Т. 54, № 12 (313). — С. 99-108.
103. Короткевич, О.С. Биохимические, гематологические параметры и

- аккумуляция тяжелых металлов в органах и тканях свиней скороспелой мясной породы / О.С. Короткевич, О.А. Желтикова, В.Л. Петухов// Доклады Российской академии с.х. наук. – 2009. – №4. – С. 41– 43.
104. Короткевич О. С. Патент № 2421726 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения содержания свинца в органах крупного рогатого скота / О. С. Короткевич, В. Л. Петухов, М. В. Стрижкова, Т. В. Коновалова. — № 2010113845/5; заявл. 08.04.2010; опубл. 20.06.2011 // Бюллетень. — 2011а. — № 17.
105. Короткевич О. С. Патент № 2426119 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения содержания кадмия в мышечной ткани крупного рогатого скота / О. С. Короткевич, В. Л. Петухов, А.И. Желтиков, Т. В. Коновалова Т.В. Петухова). — № 2010111307/15; заявл. 24.03.2010; опубл. 10.08.2011 // Бюллетень. — 2011б. — № 22.
106. Короткевич, О.С. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормах различных экологических зон Западной Сибири/ О.С. Короткевич, В.Л. Петухов, О.И. Себежко [и др.] // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – №2. – С. 27–29.
107. Короткевич О. С. Патент № 2548774 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ оценки кадмия в печени и легких крупного рогатого скота / О. С. Короткевич, К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова [и др.]; заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. аграр. ун-т. — № 2014111570/15; заявл. 25.03.2014; опубл. 20.04.2015 // Бюллетень. — 2015а. — № 11. — 6 с.: ил.
108. Короткевич О. С. Патент № 2555518 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения содержания меди в мышечной ткани рыбы / О. С. Короткевич, И. С. Миллер, Т. В. Коновалова [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный

- университет». — № 2014131162/15; заявл. 28.07.2014; опубл. 10.07.2015 // Бюллетень. — 2015б. — № 19. — 6 с.: ил.
109. Короткевич О. С. Патент № 2591825 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения содержания кадмия в печени крупного рогатого скота / О. С. Короткевич, К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный университет». — № 2015116391/15; заявл. 29.04.2015; опубл. 20.07.2016 // Бюллетень. — 2016. — № 20.
 110. Короткевич О. С. Биохимия мяса: учебник / О. С. Короткевич, О. И. Себежко, Т. В. Коновалова, Н. М. Костомахин. — Санкт-Петербург: Лань, 2026. — 336 с.
 111. Костомахин, Н.М. Совершенствование скота черно-пестрой породы различного происхождения : монография / Н.М. Костомахин, О.А. Воронкова, М.А. Габедава. — Калуга : [б. и.], 2023. — 122 с. — ISBN 978-5-907678-10-1.
 112. Кочнева, М.Л. Варьирование параметров интерьерного статуса крупного рогатого скота в период адаптации / М.Л. Кочнева, С.К. Бутеева // Научное обозрение. —2015. — №22. — С. 22–28.
 113. Кочнева, М.Л. Аспекты сохранения уникальных генофондов популяций с низкой численностью / М.Л. Кочнева, Е.В. Рубцова, С.М.О. Чыдым [и др.] // В сбор.: Актуальные проблемы агропромышленного комплекса, к 80-летию НГАУ. НГАУ. — 2016. — С. 179–183.
 114. Кочнева, М.Л. Мониторинг популяции сельскохозяйственных животных в разных экологических условиях: дис. ...док.биол.наук./ Новосиб. гос. аграр. ун-т.; Кочнева Марина Львовна. — Новосибирск, 2005. — 291 с. — Библиогр.: С. 247– 291.
 115. Кочнева, М.Л. Цитогенетика : учебное пособие пособие / М.Л.

- Кочнева. – Новосибирск : НГАУ, 2017. – 115 с.
116. Кощев, А. Г. Применение метода отбора SNP-маркеров на основе взаимной информации для повышения точности геномного прогнозирования молочной продуктивности крупного рогатого скота / А. Г. Кощев, Е. М. Аврахам // Труды Кубанского государственного аграрного университета. — 2025. — № 120. — С. 261–268.
117. Кравцов Ю. В. Исследования изменений природной среды на юго-востоке Западной Сибири / Ю. В. Кравцов, А. И. Сысо // Географическая наука и образование: современные проблемы и перспективы развития : материалы III Всероссийской научно-практической Интернет-конференции. – Новосибирск : Новосибирский государственный педагогический университет, 2014. – С. 26–34.
118. Красота, В. Ф. Разведение сельскохозяйственных животных : учебник для студентов высших учебных заведений / В. Ф. Красота, Т. Г. Джапаридзе, Н.М. Костомахин. – 6-е издание, переработанное и дополненное. – М.: КолосС, 2006. – 424 с.
119. Кроль, М.Ю. Изучение комбинированного действия соединений ртути, кадмия и свинца / М.Ю. Кроль // Геохимическая экология и биогеохимическое изучение таксонов биосферы: Мат. 3-й Российской биогеохимической школы. – Новосибирск, 2000.
120. Кузнецов, А.Ф. Крупный рогатый скот: содержание, кормление, болезни: диагностика и лечение / Под ред. А.Ф. Кузнецова. – 2 изд. доп. – СПб.: Изд. «Лань», 2016. – 752 с.
121. Кузьмина, Е.Е. Содержание тяжелых металлов в органах и тканях яков в хозяйствах республики Тыва / Е.Е. Кузьмина, Р.Б. Чысыма, О.С. Короткевич // Сибирский вестник с.-х.науки. – 2008. – №2. – С. 72–77.
122. Кузьмина, Е.Е. Содержание тяжелых металлов в органах и тканях яков разных экологических зон Республики Тыва / Е.Е. Кузьмина // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 12. – С. 40–42.
123. Куликова, С.Г. Цитогенетический мониторинг крупного рогатого

- скота в разных экологических зонах Западной Сибири и Северного Казахстана: дис. ... д-ра биол. наук./ Новосиб. гос. аграр. ун-т.; Куликова Светлана Геннадьевна. – Новосибирск, 1998. – 294 с. – Библиогр.: С.225– 291.
124. Куликова, С. Г. Спонтанные хромосомные aberrации у крупного рогатого скота в различных экологических условиях Западной Сибири / С. Г. Куликова // Современные проблемы науки и образования . – 2015. – № 3. – С. 584.
 125. Кучинский, М. П. Биоэлементы – фактор здоровья и продуктивности животных: монография / М. П. Кучинский.– Минск : Бизнесофсет, 2007. – 372 с.
 126. Лавринова, Е. В. Влияние пре- и постнатального воздействия кормовой добавки "Танамин Zn" на минеральный обмен и интенсивность роста телят-молочников / Е. В. Лавринова, А. И. Омельчук, В. В. Семенютин, В. М. Артюх // Ученые записки Казанской академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. – 2022. – Т. 250. – № 2. – С. 109-116.
 127. Лелевич, В.В. Биологическая химия // Гродно, ГрГМУ. – 2009. – 71с.
 128. Линник, Л.М. Мясная продуктивность герефордских чистопородных бычков и помесей разных поколений в условиях Витебской области / Л.М. Линник, О.В. Заяц // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. стат. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2014. – С. 146–147.
 129. Лохматова, М. Е. Генетически обусловленные нарушения обмена железа / М. Е. Лохматова, Н. С. Сметанина// Вопросы гематологии/онкологии и иммунопатологии в педиатрии. – 2017. – Том 16. – № 3. – С. 83–91.
 130. Мингжун, Л. Влияние генотипа баранов-производителей романовской породы на аккумуляцию цинка в шерсти потомства / Л.

- Мингжун, Р. Саурбаева, Л. Венронг, О.С. Себежко [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2019. – № 3 (52). – С. 91–97.
131. Мирзоев, Э. Б. Метаболизм свинца и механизмы его цитотоксического действия в организме млекопитающих / Э. Б. Мирзоев, В. О. Кобялко, И. В. Полякова // Сельскохозяйственная биология. – 2018. – Т. 53. – №6. – С. 1131–1141.
 132. Мирошников, С.А. Влияние коррекции статуса свинца и кадмия, оцененного по химическому составу шерсти, на воспроизводительные качества коров черно-пестрой породы/ С.А. Мирошников, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов [и др.]// Животноводство и кормопроизводство. – 2018. – Т. 101. – №1. – С. 67–74.
 133. Мирошников, С.А. Разработка метода выявления элементаров крупного рогатого скота / С.А. Мирошников, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов [и др.] // Вестник мясного скотоводства. – 2016. – №4. – С. 73–78.
 134. Мирошников, С.А. Качественные показатели говядины бычков различных пород и направлений продуктивности // С.А. Мирошников, А.В. Харламов, И.В. Маркова // Теория и практика переработки мяса. – 2017а. – №2. – С. 14–22.
 135. Мирошников, С.А. Наноматериалы в животноводстве (обзор) / С.А. Мирошников, С.Е. Сизова // Вестник мясного скотоводства, 2017б. – №3 (99). – С. 7–22.
 136. Мирошников, С. А. Способ отбора и подготовки проб шерсти крупного рогатого скота для исследований на элементный состав : пат. 2607751 Рос. Федерация : МПК G01N 33/48 / С. А. Мирошников, А. В. Харламов, А. Н. Фролов, О. В. Кван, Е. А. Сизова ; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИ мясного скотоводства Россельхозакадемии (или полное название по оригиналу). — № 2014145406 ; заявл. 11.11.2014 ; опубл. 10.01.2017 // Бюллетень. —

- 2017в. — № 1. — 7 с.
137. Мирошников С. А. Патент № 2747469 Российская Федерация, СПК А01К 67/100 (2020.08). Способ отбора бычков с высокой интенсивностью роста по уровню токсических элементов в шерсти / С. А. Мирошников, А. В. Харламов, А. Н. Фролов [и др.]. — № 2020127479 ; заявл. 18.08.2020 ; опубл. 05.05.2021 // Бюллетень. — 2021. — № 13. — 10 с.
 138. Михайлова, М. Е. Сравнительный анализ генетической структуры красного белорусского и голштинского скота по микросателлитным локусам / М. Е. Михайлова, Е. В. Снытков, Н. И. Тиханович [и др.] // Молекулярная и прикладная генетика. — 2025. — Т. 39. — С. 54–64.
 139. Модоров, М. В. Генетическая структура популяции голштинизированного черно-пестрого скота на территории Урала / М. В. Модоров, И. В. Ткаченко, А. А. Грин, М. Ю. Севостьянов, Н. Н. Зезин // Генетика. — 2021. — Т. 57. — № 4. — С. 437-444.
 140. Мурленков, Н. В. Сравнительная характеристика геномно оцененных быков-производителей голштинской и джерсейской пород / Н. В. Мурленков, А. И. Шендаков // Биология в сельском хозяйстве. — 2025. — № 1 (46). — С. 16-19.
 141. Назаренко, А.В. Изменчивость и сопряженность концентрации тяжелых металлов в органах и тканях свиней кемеровской породы: специальность 4.2.5. "Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных": диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Назаренко Андрей Вячеславович. — Новосибирск, 2024. — 158 с.
 142. Нарожных, К.Н. Содержание кадмия в некоторых органах и ткани бычков герефордской породы/ К.Н. Нарожных, Ю.В. Ефанова, О.С. Короткевич //Мир науки, культуры, образования. — 2012а. — №4(35). — С. 315–318.
 143. Нарожных, К.Н. Содержание РВ, CD, CU в печени бычков

- герефордской породы // Тенденции и перспективы развития современного научного знания. V Международная научно-практическая конференция. – 2012б. – С. 315-318
144. Нарожных, К.Н. Содержание железа в некоторых органах и мышечной ткани бычков герефордской породы/ К.Н. Нарожных, Ю.В. Ефанова, О.С. Короткевич, В.Л. Петухов //Молочное и мясное скотоводство. – 2013. – №1. – С. 24–25.
 145. Нарожных, К. Н. Закономерности аккумуляции тяжелых металлов в легких бычков герефордской породы в Западной Сибири / К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова, О. С. Короткевич [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1447.
 146. 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. – 2015а. – №2. – С. 2158–2163.
 147. Нарожных, К.Н. Корреляция убойной массы и содержания тяжелых металлов в органах бычков герефордской породы/ К.Н. Нарожных, Т.В. Коновалова, О.С. Короткевич // Главный зоотехник. – 2015б. – №3. – С. 37–42.
 148. 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. –2015в. –№ 2 –26. –С. 5815–5819.
 149. Нарожных, К.Н. Особенности аккумуляции и изменчивости некоторых химических элементов в волосе герефордского скота в условиях Западной Сибири / К.Н. Нарожных, А.В. Купцов// Современные проблемы науки и образования. – 2015г.– №1(1). –С.1806
 150. Нарожных, К.Н. Ассоциация показателей белкового обмена с уровнем свинца в органах и мышечной ткани мясного скота Западной

- Сибири/ К.Н. Нарожных// Вестник НГАУ. –2017а. – №3(44). – С. 141–147.
151. Нарожных К. Н. Патент № 2629605 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения уровня свинца в мышечной ткани крупного рогатого скота / К. Н. Нарожных, Т. В. Коновалова, Н. И. Шишин [и др.] ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет». — № 2016144037 ; заявл. 08.11.2016 ; опубл. 30.08.2017 // Бюллетень. — 2017б. — № 25.
 152. Нарожных, К.Н. Содержание меди в волосе разных пород крупного рогатого скота/ К.Н. Нарожных, Т.В. Коновалова, Ю.И. Федяев// Теория и практика современной аграрной науки, Сборник II Национальной (всероссийской) конференции. Февраль, 2019. – Новосибирск: НГАУ, 2019. – С. 332–335.
 153. Нарожных, К.Н. Изменчивость, корреляция и уровень тяжелых металлов в органах и тканях герефордского скота в условиях Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук/ Новосиб.гос. аграр. ун-т; Нарожный Кирилл Николаевич. – Новосибирск, 2019. –163 с. Библиогр.: С.111 – 160.
 154. 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 : Уральский государственный экономический университет, 2020. – С. 442-443.
 155. Нарожных, К. Н. Способ оценки кадмия в мышечной ткани крупного рогатого скота : пат. 2758902 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/48 / К. Н. Нарожных, Э. С. Соколова, Т. В. Коновалова [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет». — № 2021112345 ; заявл.

- 28.04.2021 ; опубл. 02.11.2021 // Бюллетень. — 2021. — № 31.
156. Нарожных, К. Н. Способ определения уровня меди в мышечной ткани крупного рогатого скота голштинской породы : пат. 2837378 Российская Федерация / К. Н. Нарожных, О. А. Зайко, Т. В. Коновалова [и др.] ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет». — № 2024110093 ; заявл. 13.04.2024 ; опубл. 31.03.2025 // Бюллетень. — 2025. — № 13.
157. Незавитин А.Г. Проблемы сельскохозяйственной экологии / А.Г. Незавитин, В.Л. Петухов, А.Н. Власенко [и др.] – Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. – 255 с.
158. Нотова, С. В. Изучение химических форм меди и марганца в живом организме / С. В. Нотова, Т. В. Казакова, О. В. Маршинская // Животноводство и кормопроизводство. – 2020. – Т. 103. – № 1. – С. 47–64.
159. Нохрин, Д. Ю. Нелинейные главные компоненты биохимического профиля молочного скота пяти пород / Д. Ю. Нохрин, О. В. Соколова, А. И. Белоусов, А. Г. Исаева, Е. В. Мокерова, Ю. С. Герасимова // Аграрный вестник Урала. – 2024. – Т. 24, № 08. – С. 1056–1070.
160. Оберлис, Д. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных / Д. Оберлис, Д. Харланд, А. Скальный. – СПб.: Наука, 2008. – 544 с.
161. Осадчук, Л.В. Гормональный и метаболический статус бычков голштинской породы эколого-климатических условиях Кемеровской области/ Л.В. Осадчук, О.И. Себежко, Н.Г. Шишин [и др.]. //Вестник НГАУ. –2017а. – № 2 (43). –С. 52–61.
162. Осадчук, Л.В. Физиологический статус быков-производителей трех пород в эколого-климатических условиях Алтайского края / Л.В.

- Осадчук, М.А. Клещев, О.И. Себежко [и др.]// В сборнике: Материалы XXIII съезда Физиологического общества им. И. П. Павлова с международным участием. – 2017б. – С. 2482– 2484.
163. ОСТ 10 201-97. Сенаж. Технические условия: стандарт отрасли: утвержден и введен в действие Департаментом ветеринарии Минсельхозпрода РФ 15.07.1997. – Москва, 1997. – 10 с.
164. Патрашков, С.А. Аккумуляция тяжелых металлов в волосе сельскохозяйственных животных разных видов: дис. ... канд. биол. наук/ Новосиб. гос. аграр. ун-т; Патрашков Сергей Анатольевич. – Новосибирск, 2003. – 128 с.
165. Петухов, В. Л. Генетические основы селекции животных / В. Л. Петухов, Л. К. Эрнст, И. И. Гудилин [и др.]. – Москва: Росагропромиздат, 1989. – 448 с.
166. Петухов, В. Л. Генофонд скороспелой мясной породы свиней / В. Л. Петухов, В. Н. Тихонов, А. И. Желтиков. – Новосибирск: Издательско-полиграфический центр «Юпитер», 2005. – 631 с.
167. Петухов В.Л. Способ определения содержания свинца в органах свиней / Петухов В.Л., Патрашков С.А., Короткевич О.С., Мармулева Н.И., Матиосов А.Д., Себежко О.И., Желтиков А.И., Камалдинов Е.В., Батенева Е.В. // Патент на изобретение RU 2285920 С1. – 2006. – № 2005102873/15 ; заявл. 04.02.2005 ; опубл. 20.10.2006.
168. Петухов, В. Л. Генетика: учебное пособие / В. Л. Петухов, О. С. Короткевич, С. Ж. Стамбеков, А. И. Жигачев, А. В. Бакай. – 2-е изд. – Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука", 2007. – с. 628.
169. Петухов В. Л. Патент № 2342659 Российская Федерация, МПК G01N 33/48. Способ определения содержания кадмия в органах и мышечной ткани свиней / В. Л. Петухов, О. А. Желтикова, А. И. Желтиков [и др.] ; заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. аграр. ун-т. — № 2007111437/15 ; заявл. 28.03.2007 ; опубл. 27.12.2008 //

- Бюллетень. — 2008. — № 36. — 6 с.
170. Петухов, В. Л. Способ стимуляции репродуктивных качеств свиноматок : пат. 2377772 Рос. Федерация : МПК А61К 31/00 / В. Л. Петухов, О. С. Короткевич, О. И. Себежко, Т. В. Петухова ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный университет». — № 2008122175/13 ; заявл. 02.06.2008 ; опубл. 10.01.2010 // Бюллетень. — 2010. — № 1. — 6 с.
 171. Петухов, В.Л. Элементный состав производных кожи животных как показатель содержания тяжелых металлов в организме / В.Л. Петухов, О.И. Себежко, Ю.И. Федяев [и др.] // В сборнике: Теория и практика современной аграрной науки Сборник II Национальной (всероссийской) конференции. – Новосибирск, 2019. – С. 342– 343.
 172. Петухов, В.Л. Содержание тяжелых металлов в мышцах судака (STIZOSTEDION LUCIOPERCA) / В.Л. Петухов, И.С. Миллер, О.С. Короткевич//Вестник НГАУ. – 2012. – №2– 2 (23). – С. 49– 52.
 173. Петухов, В.Л. Генетические основы селекции животных / В.Л. Петухов, Л.К. Эрнст, И.И. Гудилин [и др.]. - Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 452 с.
 174. Полозюк, О.Н. Гематология: учебное пособие /О.Н. Полозюк, Т.М. Ушакова. – Персиановский: Донской ГАУ, 2019. –159 с.
 175. Попова, Л.Ф. Экологическое обоснование нормирования цинка и меди в почвах Архангельска / Л.Ф. Попова, Е.Н. Наквасина//Вестник ТГПУ. – 2015. –№2 (155). – С. 156 –163.
 176. Постановление Правительства РФ от 22.04.2019 № 479 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий на 2019–2030 годы» [с изменениями и дополнениями] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2019. – № 17. – Ст. 2108.

177. Раджабов, Ф.М. Мясная продуктивность бычков черно-пестрой породы при скормливании льняного жмыха / Ф.М. Раджабов, Н.Р. Гиёсов, Т.А. Иргашев [и др.]// Зоотехния. – 2020. – №1 (81). – С.189–193.
178. Радыщ, И.В. Введение в элементологию /И.В. Радыщ, А.В. Скальный, С.В. Нотова [и др.] // Оренбургский гос. ун.-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 183 с.
179. Рождественская, Т.А. Тяжелые металлы в продукции животноводства Горного Алтая / Т.А. Рождественская, О.А. Ельчининова, А.В. Пузанов // Мир науки, культуры, образования. – 2009. – № 5 (17). – С. 14–16
180. Рождественская, Т.А. Естественные и искусственные радионуклиды в почвах, растениях и сельскохозяйственной продукции Алтайского края / Т. А. Рождественская, А. В. Пузанов, И. А. Трошкова, И. В. Горбачев [и др.]// Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2019. – № 3 (54). – С. 126 – 133.
181. Рождественская, Т. А. Некоторые особенности химического состава различных видов мяса разных агроэкологических. зонах Алтайского края / Т. А. Рождественская, С. В. Бабошкина, А. В. Пузанов [и др.] // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2021. – № 3 (62). – С. 47– 65.
182. Рослый, И. М. Биохимические показатели в медицине и биологии / И. М. Рослый. – Москва: ООО Издательство "Медицинское информационное агентство", 2015. – 612 с.
183. Рулик, М.А. Элементный состав костей млекопитающих как индикатор состояния окружающей среды. / М.А. Рулик, Н.В. Барановская, А.И. Паничев [и др.] // В сборнике: Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицины. Тр. XII

- Международной биогеохимической школы, посвященной 175 –летию со дня рождения В. В. Докучаева. Тула, 2021. – С. 457–461.
184. Рязанов, В. А. Влияние различных доз органического марганца на метаногенез и метаболические процессы в рубце мясных бычков / В. А. Рязанов, Б. С. Нуржанов, Г. К. Дускаев // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 1. – С. 102–108.
 185. Сальникова, Е.В. Цинк – эссенциальный микроэлемент (обзор)/ Е.В. Сальникова// Вестник Оренб.гос. ун-та. – 2012. – №10 (146). – С 170–172.
 186. СанПиН 2.3.2.1078 –01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. – М.: ФГУП «Интерсен», 2002. – 168 с.
 187. Себежко, О.И. Влияние генотипа быков-производителей голштинской породы на уровень некоторых показателей азотистого обмена потомства в условиях Западной Сибири / О.И. Себежко, К.Н. Нарожных, Т.В. Коновалова // Вестник НГАУ. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 72-81.
 188. Себежко, О.И. Влияние быков-производителей голштинской породы на уровень мочевины в сыворотке крови / О.И. Себежко, К.Н. Нарожных, О.С. Короткевич, Т.В. Коновалова и др. // Зоотехния. – 2021. – № 7. – С. 17-20.
 189. Себежко, О.И. Оценка фенотипической изменчивости некоторых ферментов переаминирования у крупного рогатого скота в условиях Западной Сибири / О.И. Себежко, Т.В. Коновалова, И.К. Языков [и др.] // Теория и практика современной аграрной науки. Сборник VI национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием. – Новосибирск : ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2023а. – С. 762-764.
 190. Себежко, О.И. Межпородные различия показателей холестеринowego профиля у крупного рогатого скота в Западной

- Сибири / О.И. Себежко, Т.В. Коновалова, О.С. Короткевич и др. // Вестник НГАУ. – 2023б. – Т. 67, № 2. – С. 237-250.
191. Себежко, О.И. Особенности гематологического статуса коров разных пород западной Сибири / О.И. Себежко, О.С. Короткевич, Н.Н. Кочнев // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2024. – Т. 71, № 2. – С. 259-269.
 192. Селионова, М. И. Маркер-ассоциированная и геномная селекция мясного скота / М. И. Селионова, Л. В. Евстафьева, Е. Н. Коновалова, Е. В. Белая // Тимирязевский биологический журнал. – 2023. – № 2. – С. 37–48.
 193. Сермягин, А. А. Оценка геномной вариабельности продуктивных признаков у животных голштинизированной черно-пестрой породы на основе GWAS анализа и ROH паттернов / А. А. Сермягин, О. А. Быкова, О. Г. Лоретц, О. В. Костюнина, Н. А. Зиновьева // Сельскохозяйственная биология. – 2020. – Т. 55. – № 2. – С. 257-274.
 194. Сермягин, А.А. Показатели мясной продуктивности, эффективности использования корма и химического состава мяса бычков абердин-ангусской породы / А.А. Сермягин, Н.В. Боголюбова, А.А. Белоус, Г.К. Петрякова, Н.П. Елаткин, Н.А. Зиновьева // Аграрная наука. – 2023. – № 377 (12). – С. 67-73.
 195. Скальный, А. В. Биоэлементология – новый термин или новое научное направление? / А. В. Скальный, И. А. Рудаков // Вестник ОГУ. – 2005. – №2. – С. 4 –8.
 196. Скальный, А.В. Аналитические методы в биоэлементологии / А.В. Скальный, Е.В. Лакарова, В.В. Кузнецов, М.Г. Скальная; под ред. А.В. Скального, С.П. Нечипоренко. – СПб.: Наука, 2009. – 264 с.
 197. Скальный, А.В. Медицинская элементология: учебное пособие / А. В. Скальный, М. Г. Скальная, А. А. Киричук, А. А. Тиньков. – Москва : Российский ун-т дружбы народов, 2021. – 198 с.
 198. Скуковский, Б. А. Нормирование микроэлементов в рационах

- крупного рогатого скота и регуляция минерального обмена / Б. А. Скуковский // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 1980. – № 3. – С. 45-51.
199. Солошенко, В.А. Результаты исследований по вопросам создания высокопродуктивных генотипов сельскохозяйственных животных, технологий кормоприготовления и ветеринарного обеспечения / В.А. Солошенко, Н.И. Кашеваров, А.С. Донченко, Н.А. Донченко, С.Н. Удинцев // Достижение науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30. – №4. – С. 50 – 55.
200. Солошенко, В. А. Продовольственная независимость — направления совершенствования кормопроизводства / В. А. Солошенко, С. Н. Магер, Д. С. Адушинов, С. С. Князев // Зоотехния. — 2023. — № 3. — С. 7–10.
201. Солошенко В. А. Качество говядины мясных пород крупного рогатого скота, районированных в Сибири / В. А. Солошенко, В. Ю. Бабаков, И. А. Храмцова [и др.] // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. — 2025. — Т. 55, № 5 (318). — С. 70–82.
202. Стрижкова, М.В. Содержание свинца в органах и тканях бычков черно-пестрой породы/ М.В. Стрижкова, Т.В. Коновалова (Т.В. Петухова), О.С. Короткевич // Главный зоотехник.–2011.–№6.–С.66–68.
203. 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.
204. Стрижкова, М.В. Содержание, изменчивость и корреляции микроэлементов в органах и тканях крупного рогатого скота черно-пестрой породы: дис. ... канд. биол. наук / Новоси. гос. агр. ун-т.; Стрижкова Мария Валерьевна. – Новосибирск, 2018. – 131 с. Библиогр.: С. 98– 128.
205. Сысо, А. И. Закономерности распределения химических

- элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири / А. И. Сысо; отв.ред. И.М. Гаджиева; Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 277 с.
206. Сысо, А.И. Проблемы нормирования содержания тяжёлых металлов в почвах и растениях// В сборнике: Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах материалы международной школы-семинара для молодых исследователей. Российская Федерация, Министерство образования и науки, ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН [и др.]. – Тюмень, 2014. – С. 67–75.
207. Сысо, А.И. Актуальные вопросы гигиенической и биогеохимической оценки качества почв и растительной продукции// В сборнике: Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах материалы II Международной школы-семинара для молодых исследователей, посвященной памяти профессора В. Б. Ильина. – Тюмень, 2016а. – С. 132–142.
208. Сысо, А.И. Российские нормативы оценки качества почв и кормов: проблемы их использования/ В сборнике: Экологический мониторинг окружающей среды материалы международной школы молодых ученых. Новосибирский государственный аграрный университет. – Новосибирск: НГАУ, 2016б. – С. 153–168.
209. Сысо, А.И. Современное состояние и тенденции изменения эколого-биохимической ситуация на юге Сибири/ А.И. Сысо, М.А. Мяделец, Т.И. Сиромля [и др.] // В сборнике: Современные тенденции развития биогеохимии труды биогеохимической лаборатории. – Москва, 2016в. – С. 500–510.
210. Сысо, А.И. Макро- и микроэлементы в почвах и кормовых травах прифермерских полей Барнаульского приобья/ А.И. Сысо, М.А. Лебедева, С.А. Худяев, Т.В. Коновалова [и др.]//Вестник

- Новосибирского государственного аграрного университета. – 2017а. – № 3 (44). – С. 54–61.
211. Сысо, А.И. Оценка макро- и микроэлементного состава почв и растений на сельхозугодиях Западной Сибири// В сборнике: Прогноз состояния и научное обеспечение плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения материалы XI Международного симпозиума НП «Содружество ученых агрохимиков и агроэкологов». – Москва, 2017б. – С. 88–98.
212. Тарасова, Е. И. Связь полиморфизма гена DGAT1 с элементарным составом биосубстратов и продуктивностью коров чёрно-пёстрой породы Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областей / Е. И. Тарасова, В. С. Полякова, Е. А. Сизова // Животноводство и кормопроизводство. – 2024. – Т. 107. – № 3. – С. 8-24.
213. Тарасова, Е. И. Полиморфизм генов восприимчивости к воздействию тяжёлых металлов у млекопитающих (обзор) / Е. И. Тарасова, С. В. Нотова, Б. Момчилович, И. Э. Ларюшина // Животноводство и кормопроизводство. – 2019. – Т. 102. – № 2. – С. 68-87.
214. Тарасова, Е. И. Ассоциация полиморфизма rs8193046 гена TLR4 с элементарным составом сыворотки крови коров красной степной породы / Е. И. Тарасова, Е. А. Сизова, Е. В. Яушева, С. В. Лебедев // Аграрная наука. – 2025. – № 10. – С. 121-132.
215. Тарасова, Е. И. Полиморфизм гена LRP4 и его влияние на элементарный статус и молочную продуктивность коров черно-пестрой породы в Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областях / Е. И. Тарасова, Е. В. Яушева, Е. А. Сизова // Животноводство и кормопроизводство. – 2026. – Т. 109. – № 1. – С. 8-26.
216. Темираев, Р.Б. Химический состав некоторых органов и тканей свиней разных пород при повышенном фоне тяжелых металлов в кормах / Р.Б. Темираев, Э.С. Дзодзиева, Л.В. Цалиева [и др.]// Известие

- Горского. гос. агр. ун-та. – Владикавказ. – 2015. – Т.52. – №2.– С. 72–77.
217. Титов, В.Н. Клиническая биохимия. Учебное пособие / В.Н. Титов // Инфра –М. – 2017. – 441с.
218. Толанов, И. А. Практикум по кормлению сельскохозяйственных животных / И. А. Толанов. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 236 с.
219. Торшин, И.Ю. Иерархия взаимодействий цинка и железа: физиологические, молекулярные и клинические аспекты / И.Ю. Торшин, О.А. Громова, Т.Р. Гришина [и др.] // Трудный пациент. – 2010. – Т. 8, № 3. – С. 45-53.
220. ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» : принят Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 880. – Текст : электронный. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.06.2025).
221. ТР ТС 034/2013. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности мяса и мясной продукции» : принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 09.10.2013 № 162. – Текст : электронный. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.06.2025).
222. Тютиков, С.Ф., Биогеохимические аспекты выявления микроэлементозов животных/ С.Ф. Тютиков// XI Международная биогеохимическая школа (Тула, 13–15 июня: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (Тула). – 2019. – С. 274 –277.
223. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2016. – № 49. – Ст. 6887.
224. Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» //

- Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 4. – Ст. 345.
225. Уразаев, Н.А. Эндемические болезни сельскохозяйственных животных / Н.А. Уразаев, В.Я. Никитин, А.А. Кабыш. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
226. Федяев, Ю. И. Содержание и изменчивость меди в печени быков голштинской породы Сибири / Ю. И. Федяев, Т. В. Коновалова, А. И. Шишин, О. И. Себежко // Кормопроизводство, продуктивность, долголетие и благополучие животных: материалы международной научно-практической конференции. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2018. – С. 58–61.
227. Федяев, Ю.И. Аккумуляция кадмия в почках у бычков голштинской породы / Ю.И. Федяев, Т.В. Коновалова // Роль аграрной науки в условиях развития сельских территорий. Сборник IV Всероссийской (национальной) конференции. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос». – 2019. – С.112-114.
228. Фролов, А.Н. Оценка элементного статуса организма мясных коров различного физиологического состояния / А.Н. Фролов [и др.]// Вестник мясного скотоводства. – 2017. – №1. – С. 44–49.
229. Фролов, А. Н. Новые подходы к повышению продуктивных и адаптационных качеств сельскохозяйственных животных на основе изучения элементного статуса организма : диссертация ... доктора биологических наук / Фролов Алексей Николаевич. – Оренбург, 2021. – 306 с.
230. Фролов, А.Н. Оценка продуктивных качеств и элементного статуса бычков калмыцкой породы различных генотипов по гену гормона роста / А.Н. Фролов, О.А. Завьялов, А.В. Харламов, И.Н. Сычева, И.Е. Быстренина // Животноводство и кормопроизводство. – 2022. – Т. 105. – № 1. – С. 62-73.
231. Фролов, А.Н. Влияние сезона года на элементный статус и

- продуктивные качества бычков / А.Н. Фролов, О.А. Завьялов // Животноводство и кормопроизводство. – 2024. – Т. 107. – № 4. – С. 31-40.
232. Фролов, А. Н. Патент № 2852318 Российская Федерация, МПК А61В 5/107 (2006.01), G01N 33/74 (2006.01). Способ отбора проб волос для оценки гормонального статуса бычков / А. Н. Фролов, О. А. Завьялов, С. А. Платонов, Е. С. Медетов, Т. Б. Алдыяров, Е. И. Тарасова, А. В. Харламов, Я. Я. Курилкин ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук». — № 2024137065 ; заявл. 10.12.2024 ; опубл. 08.12.2025 // Бюллетень. — 2025а. — № 34. — 7 с.
233. Фролов, А. Н. Гормональный и элементный профиль бычков, оцененный по волосу, как маркер адаптационного ответа на экстремальные температурные воздействия / А. Н. Фролов, О. А. Завьялов, С. А. Платонов [и др.] // Животноводство и кормопроизводство. – 2025б. – Т. 108, № 4. – С. 18-30.
234. Хенниг, А. Минеральные вещества, витамины, биостимуляторы в кормлении с.-х животных / А. Хенниг. – М.: Колос, 1976. – 560 с.
235. Хиггинс, К. Расшифровка клинических лабораторных анализов [Электронный ресурс] / К. Хиггинс ; пер. с англ. ; под ред. проф. В. Л. Эмануэля. – 7 –е изд. (эл.). –Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 592 с.). –М. : Лаборатория знаний, 2016. –Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". ISBN 978-5-00101-437-9
236. Чысыма, Р.Б. Хозяйственно-биологические особенности яков в различных экологических условиях республики Тыва: дисс. ...д-ра. биол. наук. – Новосибирск, 2006. – 38 с.
237. Шейко, И. П. Селекционно-генетические основы повышения адаптивности и продуктивности сельскохозяйственных животных в условиях интенсификации / И. П. Шейко // Весці Нацыянальнай

- акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2021. – Т. 59, № 1. – С. 63-74.
238. Шишин, Н.И. Элементный статус крови крупного рогатого скота голштинской породы в биогеохимических условиях Кемеровской области / Н.И. Шишин, О.И. Себежко, Ю.И. Федяев, Т.В. Скиба, Т.В. Коновалова, К.Н. Нарожных // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (44). – С. 70–79.
 239. Шошина, О.В. Роль железа в пищеварении у полигастричных животных. / О.В. Шошина, С.В. Лебедев, Е.В. Шейда // Животноводство и кормопроизводство.. – 2021. – Т. 104, № 4. – С. 170-181.
 240. Эрнст, Л.К. Биологические проблемы животноводства в XXI веке/ Л.К. Эрнст, Н.А. Зиновьева. – М.: ВНИИХС, 2008. – 508 с.
 241. Эрнст, Л. К. Профилактика генетических аномалий у крупного рогатого скота / Л. К. Эрнст, А. И. Жигачев. – Л. : Агрономиздат. Ленинг. отд-ние, 1990. – 240 с.
 242. Юдичев, Ю.Ф. Анатомия животных: уч. пособие / Ю.Ф. Юдичев, В.В. Дегтярев, Г.А. Хонин; под ред. проф. В.В. Дегтярева. – Оренбург: Изд. центр ОГАУ, 2013. – 298 с.
 243. Afonso, T. Muscle transcriptome analysis reveals genes and metabolic pathways related to mineral concentration in *Bos indicus* / T. Afonso, P. C. Tizioto, J. F. Taylor [et al.] // BMC Genomics. – 2019. – Vol. 20. – P. 1-14.
 244. Ahmad, H. Editorial: Omics technologies in livestock improvement: From selection to breeding decisions / H. Ahmad, Y. Zhang, L. Li // Frontiers in Genetics. – 2023. – Vol. 14. – P. 1-4.
 245. Alimba, C. Genotoxicity and cytotoxicity of chromium, copper, manganese and lead, and their mixture in WIL2 –NS human B lymphoblastoid cells is enhanced by folate depletion / C. Alimba, V. Dhillon, A. Bakare// Genetic Tox. and Env. Mutagenesis. – 2016. – № 798 –799. – P. 35–47.

246. Al-Mamun, M. H. Genome-wide linkage disequilibrium and genetic diversity in five populations of Australian domestic sheep / M. H. Al-Mamun, A. A. Clark, S. J. P. [et al.] // *Genetics Selection Evolution*. – 2015. – Vol. 47. – P. 67.
247. Alonso, M. L. Interactions between toxic (As, Cd, Hg and Pb) and nutritional essential (Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) elements in the tissues of cattle from NW Spain / M. L. Alonso, F. P. Montana, M. Miranda // *BioMetals*. – 2004. – № 17(4). – P. 389–397.
248. Anderson, J. J. B. Minerals // *Krause's Food, Nutrition, & Diet Therapy* / ed. by L. K. Mahan, S. Escott-Stump. — 11th ed. — Philadelphia: Saunders, 2004. — Ch. 5. — P. 120–163.
249. Andjelkovic M. Toxic Effect of Acute Cadmium and Lead Exposure in Rat Blood, Liver, and Kidney / M. Andjelkovic, A. Buha Djordjevic, E. Antonijevic, B. Antonijevic, M. Stanic, J. Kotur-Stevuljevic, V. Spasojevic-Kalimanovska, M. Jovanovic // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2019. – Vol. 16. – № 2. – P. 274. – DOI: 10.3390/ijerph16020274.
250. Ansari, S. Alkaline phosphatase activity of serum affects osteogenic differentiation cultures / S. Ansari, K. Ito, S. Hofmann // *ACS Omega*. – 2022. – T. 15, № 7. – P. 12724-12733.
251. Aschner, M. Manganese: recent advances in understanding its transport and neurotoxicity/ M. Ascher, T.R. Guilarte, J.S. Schneider, W. Zheng // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* – 2007. – Vol. 221. – P. 131–147.
252. Aschner, M. Manganese dosimetry: Species differences and implications for neurotoxicity /M. Aschner, K. Erikson, D. Dorman//*Critical Reviews in Toxicology*. – 2005. – Vol. 35. – Issue 1. – P. 1–32.
253. Baker, D. Efficacy of a manganese –protein chelate compared with that of manganese sulfate for chicks. / D. Baker, K. Halpin// *Poultry science*. – 1987. – № 66 (9). – P. 1561–1563.
254. Babalola, O. Distribution of lead in selected organs and tissues of

- albino rats exposed to acute lead toxicity / O. Babalola, R. Okonji, J. Atoyebi // *Scientific Research and Essays*. – 2010. – № 5(9). – P. 845 – 848.
255. Beernaert, J. Non –destructive pollution exposure assessment by means of wood mice hair / J. Beernaert, J. Schiers, H. Leirs [et al.]// *Environ. Pollut.* –2007. – Vol. 145. – №2. – P. 443–451.
256. Bertin, G. Cadmium: cellular effects, modifications of biomolecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review) / G. Bertin, D. Averbeck // *Biochemic.* – 2006. – Vol. 88. – Issue 11. – P. 1549–1559.
257. Bolan, N. Zinc in soil-crop-animal-human health continuum: A review / N. Bolan, Ch. Srinivasarao, C. Rocco [et al.] // *Advances in Agronomy*. – 2025. – № 189. – P. 1-61.
258. Bradley, B. D. Effects of graded levels of dietary copper on copper and iron concentrations in swine tissues. / B. D. Bradley, G. Graber, R. J. Condon // *Journal of Animal Science*. – 1983. – № 56. – P. 625–630.
259. Briffa, J. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans / J. Briffa, E. Sinagra, R. Blundell // *Heliyon*. – 2020. – № Volume 6, Issue 9. – P. 1–26.
260. Brzóska, M. Interactions between cadmium and zinc in the organism / M. Brzóska, J. Moniuszko –Jakoniuk // *Food and Chemical Toxicology*. – 2001. – Vol. 39. – Issue 10. – P. 967–980.
261. Brummer-Holder, M. Interrelationships Between Age and Trace Element Concentration in Horse Mane Hair and Whole Blood / M. Brummer-Holder, B. D. Cassill, S. H. Hayes // *Journal of Equine Veterinary Science*. – 2020. – Vol. 87. – P. 102922. – DOI: 10.1016/j.jevs.2020.102922.
262. Buitenhuis, B. Estimation of genetic parameters and detection of quantitative trait loci for minerals in Danish Holstein and Danish Jersey milk / B. Buitenhuis, L. Poulsen [et al.] // *Journal of Dairy Science*. – 2015. –

- Vol. 98, № 9. – P. 6363-6374.
263. Cabrera, M.C. Selenium, copper, zinc, iron and manganese content of seven meat cuts from Hereford and Braford steers fed pasture in Uruguay/ M.C. Cabrera [et al.] // Meat Science. – 2010. – Vol. 84. – №3. – P. 518–528.
 264. Canty, M.J. Cadmium and other heavy metal concentrations in bovine kidneys in the Republic of Ireland/ Mary J. Canty, Aiden Scanlonc, Daniel M.Collins [et al.]// Science of the Total Environment. – 2014– Vol. 485–486. – 1 July 2014. – P. 223–231.
 265. Camaschella, C. Iron –deficiency anemia/ C. Camaschella // N. Eng. J. Med. –2015; 372. – P. 1832–1843.
 266. Capra, E. Comparison between indicine and taurine cattle DNA methylation reveals epigenetic variation associated to differences in morphological adaptive traits / E. Capra [et al.] // Frontiers in Genetics. – 2023. – Vol. 14. – P. 1123456.
 267. Chan, S. The role of copper, molybdenum, selenium, and zinc in nutrition and health/ S. Chan, B. Gerson, S. Subramaniam // Clin. Lab. Med. – 1998. – Vol.18. – P. 673–685.
 268. Chasapis, T. C. Zinc and human health: an update / T. C. Chasapis, C. L. Ariadni, A. S. Chara // Archives of Toxicology. – 2012. – Vol. 86. – P. 521–534.
 269. Chernitskiy, A. Study of interrelation of the bioelement status of mother and fetus cattle / A. Chernitskiy, T.S. Skogoreva // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences. – 2020. – Vol. 10. — P. 154–170.
 270. Collins, J.F. Copper / J.F. Collins, L.M. Klevay// Adv. Nutr. – 2011. – Vol.2. – P.520–522.
 271. Crooijmans, R. P. M. A. IMAGE001: A new livestock multispecies SNP array to characterize genomic variation in European livestock gene bank collections / R. P. M. A. Crooijmans [et al.] // Frontiers in Genetics. –

2025. – Vol. 16. – P. 1–12.
272. Denholm, E. Correlations of milk and serum element concentrations with production and management traits in dairy cows / E. Denholm [et al.] // *Journal of Dairy Science*. – 2022. – Vol. 105, № 4. – P. 3215-3228.
 273. Denoyelle, C. Genetic Variations and Differential DNA Methylation to Face Contrasted Climates in Small Ruminants / C. Denoyelle [et al.] // *Frontiers in Genetics*. – 2021. – Vol. 12. – P. 654321.
 274. Ducos, A. Chromosomal control of pig populations in France: 2002–2006 survey / A. Ducos [et al.] // *Cytogenetic and Genome Research*. – 2007. – Vol. 119, № 1–2. – P. 150–156.
 275. Dzitsiuk, V. Chromosomal anomalies in dairy cattle as reasons of impaired fertility / V. Dzitsiuk, H. Tipilo // *Agricultural Science and Practice*. – 2019. – № 6(1). – P. 60–66.
 276. Engle, T.E. Dietary copper effects on lipid metabolism, performance, and ruminal fermentation in finishing steers / T.E. Engle, Spears J.W. // *J. Anim. Sci.* – 2000. – № 78. – P. 2452–2458.
 277. Fankun, Zhou. Insights into cognitive deficits caused by low –dose toxic heavy metal mixtures and their remediation through a postnatal enriched environment in rats/ Z. Fankun, Y. Guangming, G. Yanyan and [et al.] // *J. of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol.388. – P. 122081.
 278. Flanagan, P. R. Comparative effects of iron deficiency induced by bleeding and a low –iron diet on the intestinal absorptive interactions of iron, cobalt, manganese, zinc, lead and cadmium / P. R. Flanagan, J. Haist, L. S. Valberg // *J. Nutr.* – 1980. – № 110(9). – P. 1754 –1763.
 279. Fujiwara, Y. Cadmium induces iron deficiency anemia through the suppression of iron transport in the duodenum / Yasuyuki Fujiwaraab, Leea Jin –Yong, Banno Hiroki // *Toxicology Letters*. – 2020. – № Volume 332. – P. 130 –139.
 280. Garcia, S.J. Iron deficient and manganese supplemented diets alter metals and transporters in the developing rat brain/ S.J. Garcia, K. Gellein,

- T. Syversen and [et al.] // *Toxicol. Sci.* – 2007. – Vol. 95. – P. 205–214.
281. Garcia-Vaquero, M. Toxic and trace elements in intensive swine in Galicia (Northwest Spain) / M. Garcia-Vaquero, M. Lopez-Alonso // *Proceedings of the 13th International Conference Production Diseases in Farm Animals*; ed. by M. Förl. – 2007. – P. 283. – ISBN 978-3-934178-90-8.
282. Georgievskii, V.I. Mineral nutrition of animals / V.I. Georgievskii, B.N. Annenkov, V.T. Samokhin. – M.: Kolos, 1979. – 471 p.
283. Ghafourian, K. Iron and heart failure: diagnosis, therapies, and future directions / Ghafourian Kambiz, S. S. Jason, Goodman Lauren [et al.] // *JACC: Basic to Translational Science*. – 2020. – № Volume 5, Issue 3. – P. 300–313.
284. Goyer R.A. Toxic and essential metal interactions / R.A. Goyer // *Annual Review of Nutrition*. – 1997. – № 17. – P. 37–50.
285. Gustavsson, I. Distribution of the 1/29 translocation in the A.I. Bull population of Swedish Red and White cattle / I. Gustavsson // *Hereditas*. – 2009. – Vol. 146, № 1–2. – P. 1–6.
286. Gwaltney-Brant, S. M. Veterinary Forensic Toxicology / S. M. Gwaltney-Brant // *Veterinary Pathology*. – 2016. – Vol. 53, № 5. – P. 1067–1077. – DOI: 10.1177/0300985816641994.
287. Hasan, S. Determination of heavy metals in meat and organs of cattle maintained and grazed in mine revegetation area after have been quarantined / S. Hasan, A. Ako, F.R. Zakaria [et al.] // *American –Eur. J. of Sus. Agr.* – 2016. – V.10. – №2. – P. 43–47.
288. Hejna, M. Interior traits as selection criteria in farm animals / M. Hejna [et al.] // *Journal of Animal Science*. – 2018. – Vol. 96. – P. 2345–2356.
289. Hollo, G. Effect of feeding on the composition of longissimus muscle of Hungarian Grey and Holstein Friesian bulls. III. Amino acid composition and mineral content / G. Hollo, K. Nuernberg, I. Hollo [et al.] // *Archiv für*

- Tierzucht. – 2007. – Vol. 50, № 6. – P. 575–586.
290. Hozo S.P., Djulbegovic B., Hozo I. Estimation the mean and variance from the median, range and the size of a sample [Электронный ресурс] // BMC Medical Research Methodology. – 2005. – Vol. 5(1). – P. 13. – Режим доступа: <https://bmcmmedresmethodol.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/1471-2288-5-13> (дата обращения: 01.05.2021).
 291. Iannuzzi, L. Chromosome Abnormalities and Fertility in Domestic Bovids: A Review / L. Iannuzzi [et al.] // Animals. – 2021. – Vol. 11, № 5. – P. 1345.
 292. Iannuzzi, L. Molecular Cytogenetics in Domestic Bovids: A Review / L. Iannuzzi [et al.] // Animals. – 2023. – Vol. 13, № 9. – P. 2134.
 293. Jia, Q. Pb (2+) modulates ryanodine receptors from the endoplasmic reticulum in rat brain / Q. Jia, G. Du, Y. Li et al. // Toxicol. Appl. Pharmacol, – 2018. – Vol. 338. – P. 103–111.
 294. Kaur, K. Zinc: The metal of life / K. Kaur, R. Gupta, S. Saraf [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2014. – Vol. 13. – Issue 4. – P. 358–376.
 295. Kepka, M. Identification of Genomic Instability in Cows Infected with BVD Virus / M. Kepka [et al.] // Viruses. – 2023. – Vol. 15, № 2. – P. 456.
 296. King, J. C. Does zinc absorption reflect zinc status? / J. C. King. // Int. J. Vitam. Nutr. Res. – 2010. – Vol. 80(4–5). – P. 300–306.
 297. Kim, D.G. Cadmium and lead in animal tissue (muscle, liver and kidney), cow milk and dairy products in Korea/ D.G. Kim, M. Kim, J.Y. Shin [et al.] // Food Addit. Contam. Part B Surveill. – 2016. – Vol.9. – P. 33–37.
 298. Klingenberg, C. P. Phenotypic Plasticity, Developmental Instability, and Robustness / C. P. Klingenberg // Journal of Evolutionary Biology. – 2019. – Vol. 32, № 5. – P. 381–385.
 299. Konovalova, T. The concentration of heavy metals in the liver of West Siberian cattle//17th International Conference of Heavy Metals in the

- Environment. 22 –25 September 2014. – Guiyang, China. – 2014. – P.75.
300. Konovalova, T.V. Interspecies differences in Zn content in liver of animals of the Siberian region/ T.V. Konovalova T, K.N. Narozhnykh, Y.I. Fedyaev, O.I. [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 other Transition Metals in Health and Disease. Editor: Lothar Rink, Inga Weßels, Martina Maywald. –2017a. –P. 40.
 301. Konovalova, T.V. Copper content in hair, bristle and feather in different species reared in Western Siberia/ T.V. Konovalova, K.N. Narozhnykh, V.L. Petukhov, [et al.] // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. –2017b. –T. 44. № S. – P. 74.
 302. Kordas, K. New evidence of iron and zinc interplay at the enterocyte and neural tissues / K. Kordas, R.J. Stoltzfus // J. Nutr. – 2004. – № 134. – P. 1295–1298.
 303. Korotkevich, O.S. Single nucleotide polymorphism in dairy cattle populations of West Siberia/ O.S. Korotkevich, M.P. Lyukhanov, T.B. Konovalova [et al.] // 10th World Congress of Genetics Applied to Livestock Production. Vancouver, BC, Canada. – August 17 –22, 2014.
 304. Kris, V. K. Iron Overload / V. K. Kris. – Twenty Sixth Edition. – Lee Goldman MD, in Goldman –Cecil Medicine, 2020.
 305. Lakhal-Littleton, S. An essential cell-autonomous role for hepcidin in cardiac iron homeostasis / S. Lakhal-Littleton, M. Wolna, Y. J. Chung [et al.] // eLife. – 2016. – Vol. 5. – Art. e19804. – DOI: 10.7554/eLife.19804.
 306. Lopez-Alonso, M. Trace Minerals and Livestock: Not Too Much Not Too Little / M. Lopez-Alonso // Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 217-234.
 307. Lopez –Alonso, M. Subcellular distribution of hepatic copper in beef cattle receiving high copper supplementation / M. López –Alonso, P. Carbajales, M. Miranda // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2017. – № 42. – P. 111–116.

308. Lopez –Alonso, M. Copper supplementation, a challenge in cattle / M. Lopez –Alonso, M. Miranda // *Animals*. – 2020. – № 10 (10). – P. 1890.
309. Litwińczuk, Z. Content of Macro- and Microelements in the Meat of Young Bulls of Three Native Breeds (Polish Red, White-Backed and Polish Black-and-White) in Comparison with Simmental and Polish Holstein-Friesian / Z. Litwińczuk, P. Domaradzki, M. Florek [et al.] // *Annals of Animal Science*. – 2015. – Vol. 15, № 4. – P. 977–985.
310. Liu, D. Genome –wide selection signatures detection in Shanghai Holstein cattle population identified genes related to adaption, health and reproduction traits / D. Liu, Z. Chen, W. Zhao [et al.]// *BMC Genomics*. – 2021. – № 22(1). – P. 1 –19.
311. Manisalidis, I. Environmental and health impacts of air pollution: a review / I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos [et al.] // *Frontiers in Public Health*. – 2020. – № 8. – P. 1 –13.
312. Marshinskaia, N. V. Elemental status of farm animals from different regions with different environmental loads / N. V. Marshinskaia [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 848, № 1. – P. 012045.
313. Mateescu, R. G. Genome –wide association study of concentrations of iron and other minerals in longissimus muscle of Angus cattle / R. G. Mateescu, D. J. Garrick, R. G. Tait and [et al.] doi: 10.2527/jas.2012–6079 // *J. Anim. Sci.* – 2013. – Vol. 91(8). – P. 3593 –6000.
314. Maxwell A. I. Heavy metal composition of livers and kidneys of cattle from southern Nigeria/ A.I. Maxwell // *Vet. Arh.* – 2008. – 78, P.– 401–410.
315. McDonald, J.H. Handbook of Biological Statistics / J.H. McDonald. – 3rd ed. – Baltimore: Sparky House, 2014. – 296 p.
316. McLeana, C.M. Mammalian hair as an accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments / C.M.McLeana, C.E.Koller, J.C. Rodger [et al.] // *Science of The Total Environment*. –

2009. – Vol. 407. – Issue 11. – P. 3588–3596.
317. Michalak, I. Exposure to nickel by hair mineral analysis / I. Michalak, M. Mikulewicz, K. Chojnacka [et al.] // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. – 2012. – Vol. 34. – Issue 3. – P. 727–734.
 318. Misztal, I. Genetic control of environmental variance in livestock mineral traits / I. Misztal [et al.] // *Journal of Animal Science*. – 2021. – Vol. 99. – P. 1-12.
 319. Mulder, H. A. Selection for uniformity in livestock by exploiting genetic heterogeneity of residual variance / H. A. Mulder, P. Bijma // *Animal*. – 2008. – Vol. 2, № 1. – P. 45-56.
 320. Mullis, L.A. Effects of breed (Angus vs Simmental) and copper and zinc source on mineral status of steers fed high dietary iron / L.A. Mullis, J.W. Spears, R.L. McCraw // *J. Anim. Sci.* – 2003. – № 81. – P. 318–322.
 321. Miranda, Marta. Copper, zinc, iron, and manganese accumulation in cattle from Asturias (northern Spain) / Marta Miranda, L. A. Marta, L. B. José. // *Biol. Trace Elem. Res.* – 2006. – Vol. 109(2). – P. 135 –143.
 322. Moorhead, P. S. Chromosome preparations of leukocytes cultured from human peripheral blood / P. S. Moorhead, P. C. Nowell, W. J. Mellman [et al.] // *Experimental Cell Research*. – 1960. – Vol. 20, № 3. – P. 613-616.
 323. Narozhnykh K.N. Cadmium content variability in organs of West Siberian Hereford bull-calves / V. L. Petukhov, K.N. Narozhnykh, T.V. Konovalova [et al.] // 17th International Conference of Heavy Metals in the Environment. Proceeding of Abstract. – Guiyang, China: Изд. University of Guiang. – 2014 – P. 74.
 324. Narozhnykh, K.N. Cadmium accumulation in soil, fodder, grain, organs and muscle tissue of cattle West Siberia (Russia) / K.N. Narozhnykh, T.V. Konovalova, V.L. Petukhov [et al.] // *International J. of Adv. Biotechnology and Research*. – 2016. – T. 7. № 4. – P. 1758–1764.
 325. Narozhnykh, K.N. Influence of anthropogenic pollution on interior

- parameters, accumulation of heavy metals in organs and tissues, and the resistance to disorders in the yak population in the republic of Tyva / K.N. Narozhnykh, T.V. Konovalova, J.I. Fedyaev [et al.] // Indian J. of Ecology. – 2017a. – T. 44. № 2. – P. 217–220.
326. Narozhnykh 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. – 2017b. – T.44. – №2. – P.217-220.
327. 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. – P. 866–871.
328. Narozhnykh, K.N. Specific of accumulation of manganese in organs and tissues of Hereford cattle / K. N. Narozhnykh, V. L. Petukhov, A. I. Syso, T. V. Konovalova [et al.] // Brazilian Journal of Biology. – 2024a. – № 84. – P. e282174
329. Narozhnykh, K. Development of a Predictive Model for Iron Levels in Bovine Muscle Tissue Using Hair as a Predictor / K. Narozhnykh // Animals. – 2024b. – № 14. – P. 1028.
330. NRC. Nutrient Requirements of Dairy Cattle / National Research Council. – 3th revised Edn. – Washington.: National Academy of Sciences, 1978. – Электронный доступ: <https://doi.org/10.17226/20049>. Дата обращения: 17.04.2020
331. NRC. Nutrient Requirements of Dairy Cows / NRC (National Research Council). – 5th edn. – Washington, DC.: National Academy of Sciences, 2001. – 401 p.
332. Nriagu, J. Levels of As, Cd, Pb, Cu, Se and Zn in bovine kidneys and livers in Jamaica / J. Nriagu, M. Boughanen, A. Linder [et al.] // Ecotoxicol Environ Saf. – 2009. – № 72. – P. 564 –571.
333. Olschewsky, A. An Overview of the Use of Genotyping Techniques

- for Assessing Genetic Diversity in Local Farm Animal Breeds / A. Olschewsky [et al.] // *Animals*. – 2021. – Vol. 11, № 7. – P. 2034.
334. Oymak, T. Some Heavy Metal Contents of Various Slaughtered Cattle Tissues in Sivas-Turkey / T. Oymak, H. Ulusoy, E. Hastaoglu // *JOTCSA*. – 2017. – T. 3, № 4. – C. 721-728.
335. Osadchuk, L.V. Characterizing physiological status in three breeds of bulls reared under ecological and climate conditions of the Altai region/ L.V. Osadchuk, M.A. Kleshchev, O.I. Sebezhko, T.V. Konovalova [et al.] // *Iraqi J. of Vet. Sciences*. – 2017. – Vol. 31. – Issue 1. – P. 35–42.
336. Pal, M. Lead Exposure in Different Organs of Mammals and Prevention by Curcumin–Nanocurcumin: a Review / M. Pal, M. Sachdeva, N. Gupta [et al.] // *Biological Trace Element Research*. – 2015. – T. 2, № 168. – P. 380–391.
337. Pereira, V. Trace Element Concentrations in Beef Cattle Related to the Breed Aptitude / V. Pereira, P. Carbajales, M. López-Alonso // *Biological Trace Element Research*. – 2018. – T. 1, № 186. – P. 135–142.
338. Perry, P. New Giemsa method for the differential staining of sister chromatids / P. Perry, S. Wolff // *Nature*. – 1974. – Vol. 251, № 5471. – P. 156-158.
339. Petukhova, T. V. (Konovalova T.V.) Content of heavy metals in the muscle tissue of cattle / T. V. Petukhova // *E3S Web of Conferences : proceedings of the 16th International Conference on Heavy Metals in the Environment (ICHMET 2013), Rome, Italy, September 23-27, 2013. – 2013. – Vol. 1, article number 15002. – P. 409–411. – DOI: 10.1051/e3sconf/20130115002*.
340. Petukhov, V. L. Deploidy frequency of somatic cells in cattle from polluted and clear zone / V. L. Petukhov, M. L. Kochneva, O. S. Korotkevich, A. I. Zheltikov // *Book of Abstracts of the 52nd Annual Meeting of European Association for Animal Production*. – 2001. – P. 30.
341. Petukhov, V.L. Cadmium content variability in organs of West

- Siberian Hereford bull –calves/ V. Petukhov, K. Narozhnykh, O. Korotkevich [et al.] // 17th International conference of heavy metals in the environment. – 22 –25 September 2014. Guiyang, China. – P.74.
342. Petukhov, V.L. Accumulation of Cu and Zn in the soils, rough fodder, organs and muscle tissues of cattle of Western Siberia / V.L. Petukhov, A.I. Syso, K.N. Narozhnykh [et al.] // Research J. of Pharmac., Bio. and Chem.Sciences. – 2016a. – Vol. 7. – Issue 4. – P. 2458–2464.
343. Petukhov, V.L. Effect of copper on biological and productive parameters of laying hens / V.L. Petukhov, I.A. Afonina, E.S. Kleptsyna, [et al.] // Research J. of Pharmac. Biol. and Chem.Sciences. – 2016b. – Vol. 7. – Issue 5. – P. 1093–1100.
344. Petukhov, V.L. Cadmium level in soil, coarse fodder, organs and tissue of cattle West Siberia / V.L. Petukhov, A.I. Syso, K.N. Narozhnykh, [et al.] // Proceedings of the 18th International Conference on Heavy Metals in the Environment Electronic resource. – 2016c. –S10–P07.
345. Pilarczyk, R. Concentrations of toxic heavy metals and trace elements in raw milk of Simmental and Holstein-Friesian cows from organic farm / R. Pilarczyk, J. Wójcik, P. Czerniak [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2013. – Vol. 185. – P. 8383–8392.
346. Ramos, A. Bioaccessibility of Se, Cu, Zn, Mn and Fe, and heme iron content in unaged and aged meat of Hereford and Braford steers fed pasture / A. Ramos, M.C. Cabrera, A. Saadoun //Meat Sci. – 2012. – Vol. 91. – Issue 2. – P. 116–124.
347. Reyer, H. Genetic Contribution to Variation in Blood Calcium, Phosphorus, and Alkaline Phosphatase Activity in Pigs / H. Reyer [et al.] // Frontiers in Genetics. – 2019. – Vol. 10. – P. 1-11.
348. Romeo, A. Zinc fate in animal husbandry systems / A. Romeo, V. Vacchina, S. Legros. // Metallomics. – 2014. – № 6(11). – P. 1999 –2009.
349. Rosenblum, H. Zinc deficiency and heart failure: a systematic review of the current literature / H. Rosenblum, J.D. Wessler, A.Gupta, [et al.]// J.

- of Cardiac Failure. – 2020. – Vol. 26. – Issue 2. – P.180–189.
350. Rovelli, R. The genetics of phenotypic plasticity in livestock in the era of climate change / R. Rovelli [et al.] // *Frontiers in Genetics*. – 2020. – Vol. 11. – P. 583.
 351. Salman, K. Sh. Study the Effects of Heavy Metals (Lead and Cadmium) on Some Biochemical parameters of Dairy Cattle in Baghdad Province / K. Sh. Salman, T. N. Dawood // *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*. – 2021. – T. 15, № 3. – P. 3364-3368.
 352. Samsonov, D. Somatic chromosomal instability in Holstein cows in Kuzbass conditions / D. Samsonov // *Bulletin of NSAU*. – 2020. – № 3. – P. 123 –130.
 353. Satarug, S. Cadmium, environmental exposure, and health outcomes / S. Satarug, S. Garrett, M. Sens [et al.] // *Environmental Health Perspectives*. – 2010. – Vol. 118. – Issue 2. – P. 182–190
 354. Schwarz, G. Molybdenum in human health and disease/ G. Schwarz, A.A. Belaidi // *Met. Ions Life Sci*. – 2013. –13. –P. 415–450.
 355. Seabright, M. A rapid banding technique for human chromosomes / M. Seabright // *The Lancet*. – 1971. – Vol. 298, № 7731. – P. 971-972.
 356. Sebezhko, O.I. Biochemical, hematological and mineral parameters in pigs of two breeds reared in large industrial complexes of Western Siberia / O.I. Sebezhko, O.S. Korotkevich, T.V. Konovalova [et al.] // 3rd Intern. Sym. for Agric. and Food – ISAF 2017. – 2017a. – P. 100.
 357. Sebezhko, O.I. Effect of a cattle breed on bull sperm quality after cryopreservation / O.I. Sebezhko, V.L. Petukhov, N.I. Shishin [et al.] // 3rd International Symposium for Agriculture and Food – ISAF 2017. – 2017b. – P. 90.
 358. Sebezhko, O.I. Influence of anthropogenic pollution on interior parameters, accumulation of heavy metals in organs and tissues, and the resistance to disorders in the yak population in the Republic of Tyva / O.I. Sebezhko, V.L. Petukhov, R.B. Chysyma [et al.] // *Journal of Pharmaceutical*

- Sciences and Research. –2017c. – Vol. 9. – Issue 9. – P. 1530–1535.
359. Sebezhko, O.I. Comparative assessment of radioactive strontium and cesium contents in the feedstuffs and dairy products of Western Siberia / O.I. Sebezhko, V.L. Petukhov, V.A. Sokolov [et al.]//Indian Journal of Ecology. –2017d. –Vol. 44. – Issue 3. – P. 662–666.
 360. Sloup, V. Zinc in the Animal Organism: A Review /V. Sloup, I. Jankovská, S. Nechybová and [et al.]//Scientia Agriculturae Bohemica. – 2017. – Vol. 48. – Issue 1. – P. 13–21
 361. Soch, M. Effect of selected factors on mineral parameters in plasma of cows / Miloslav Soch, Jan Broucek, P. Srejberova // Archives Animal Breeding. — 2010. — Vol. 53, № 5. — P. 510–519. — DOI: 10.5194/aab-53-510-2010.
 362. 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 [et al.] //J. of Pharmac. Sci. and Research. – 2017. –Vol. 9. – Issue 4. –P. 368–374.
 363. Tchounwou, P. Heavy metal toxicity and the environment / P. Tchounwou, C. Yedjou, A. Patlolla [et al.]// Molecular, Clinical and Environmental Toxicology Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. – 2012. – № 101. – P. 133 –164.
 364. Tillquist, N. PSVII –12 Investigating the influence of copper supplementation on copper homeostatic genes in bovine liver / N. Tillquist, M. Thorndyke, T. Thomas [et al.] // J. of Animal Science. – 2020. – № 98(4). – P. 308.
 365. Tizioto, P.C. Detection of quantitative trait loci for mineral content of Nelore longissimus dorsi muscle/ P.C. Tizioto, J.F. Taylor, J.E. Decker [et al.]// Genetics Selection Evolution. – 2015. – V. 47.15. – P. 1 –9. DOI 10.1186/s12711 –014 –0083 –3
 366. Thompson, L. Copper //Veterinary Toxicology: Basic and Clinical Principles: Third Edition, 2018. – P. 425–427

367. Tomović, V. Cadmium and lead in female cattle livers and kidneys from Vojvodina, northern Serbia / V. Tomović, M. Jakanović, M. Tomović [et al.]// J. Food Additives & Contaminants: Part B. – 2017. –V.10. Issue 1. – P. 39–43
368. Tsygankova, A.R. Analysis of trace elements in the hair of farm animals by atomic emission spectrometry with DC ARC excitation sources / A.R. Tsygankova, A.V. Kuptsov, K.N. Narozhnykh [et al.]//Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. – 2017. – Vol. 9. – Issue 5. – P. 601–605.
369. Valenzuela, V. C. Iron, zinc and copper content of cow meat / V. C. Valenzuela, C. M. Letelier, G. M. Olivares [et al.] // Revista Chilena de Nutrición. – 2008. – № 35(2). – P. 139 –146.
370. Wang, S. Influences of lead exposure on its accumulation in organs, meat, eggs and bone during laying period of hens / S. Wang, Q. Li, Y. Gao //Poultry Science. – 2021. – № 100(8). – P. 101249.
371. WHO. Copper. Environmental Health Criteria 200 / World Health Organization. – Geneva: WHO, 1998. – 360 p.
372. Wojcik, E. Assessment of genome stability in various breeds of cattle / E. Wojcik, M. Szostek // PLoS ONE. – 2019. – № 14(6). – P. 1–14.
373. Xue, J. L. Effects of different doses of excessive iron in diets on oxidative stress in immune organs of sheep / J. L. Xue, H. Z. Jing, Y. Z. Liang // Biol. Trace Elem. Res. – 2020. – Vol. 197(2). – P. 475 –486.
374. Yang, H. Cadmium transporters in the kidney and cadmium-induced nephrotoxicity /H. Yang, Y. Shu //International Journal of Molecular Sciences, 2015. – Vol. 16. – Issue 1. – P. 1484–1494.
375. Zhanga, S. Highly accurate determination of Zn and Cu in human hair by ultrasound assisted alkali dissolution combined with laser –induced breakdown spectroscopy / S. Zhanga, Y. Chua, Sh. Ma [et al.]// Microchemical J. – September. – 2020. – Vol. 157. – P. 105018.