

На правах рукописи



ЖИГУЛИН ТИМОФЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПЛЕМЕННАЯ ЦЕННОСТЬ БЫКОВ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ
СЕЛЕКЦИИ ПО МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ИХ ДОЧЕРЕЙ В УСЛОВИЯХ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

4.2.5 – Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Новосибирск 2026

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

Научный руководитель: **Камалдинов Евгений Варисович,**
доктор биологических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Ахметов Тахир Мунавирович,**
доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
аграрный университет», заведующий
кафедрой биологии, генетики, общей и
биологической химии.

Прожерин Валентин Петрович,
доктор сельскохозяйственных наук,
Приморский филиал ФГБУН «Федеральный
исследовательский центр комплексного
изучения Арктики имени академика Н.П.
Лаврова Уральского отделения Российской
академии наук» – «Архангельский научно-
исследовательский институт сельского
хозяйства», старший научный сотрудник
лаборатории животноводства.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
аграрный университет»

Защита диссертации состоится « 16 » октября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.025.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий», по адресу: 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Маренков Владимир Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методологии оценки племенной ценности быков-производителей в природно-климатических условиях Западной Сибири. Проблема качества первичных данных препятствует внедрению элементов крупномасштабной селекции с использованием методологии лучшего линейного несмещенного прогноза (BLUP). В условиях Западной Сибири на животноводческих предприятиях также возрастает роль взаимодействия «генотип-среда» в изменчивости признаков молочной продуктивности. Данный фактор может существенно влиять на точность оценки генетического потенциала быков зарубежной селекции, генетический потенциал которых оценивался по зарубежной популяции.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время широкому кругу вопросов селекционно-племенной работы, включая фенотипическую оценку дочерей быков-производителей и влияние зарубежного генофонда на изменчивость хозяйственно-полезных признаков крупного рогатого скота, посвящено достаточно научных работ [Ахметов и др., 2008; Елисеева (Огнева) и др., 2012; Ильин и др., 2012; Карягин, Желтиков, 2007; Костомахин, 2012; Костомахин, Бадмажапова, 2004; Костомахин, Бадмажапова, Костомахина, 2005; Кошаев, Гырнец, 2024; Петухов, Тихонов, Желтиков, 2006; Прожерин, Ялуга, Кувакина, 2026; Эрнст и др., 2007а, 2007б]. Реализация генотипов производителей в разных условиях среды также представляется важной проблемой и зависит от аллелофонда отечественных популяций скота, разводимого в разных природно-климатических и хозяйственных условиях нашей страны [Волкова и др., 2017; Зиновьева и др., 2019; Петров, Камалдинов, 2024; Часовщикова, 2019]. Применение методов BLUP и моделей тестового дня также распространено в современной зоотехнической практике и широко рассмотрено в отечественных исследованиях [Мамонтова и др., 2020; Племяшов и др., 2016; Сермягин и др., 2017; Столповский, Пискунов, Свищева (Исакова), 2020; Чиндалиев, 2022]. Следует отметить, что исследования взаимодействия «генотип–среда» с применением математических моделей норм реакций, преимущественно представлены в зарубежных публикациях [Rezende de et al., 2020; Santana et al., 2025; Zhang et al., 2019].

К сожалению, оценка племенной ценности быков в условиях Западной Сибири не проводится комплексно, так как одной из причин является качество данных зоотехнического учета [Камалдинов и др., 2022, 2024]. До настоящего времени не разработан комплексный подход, предполагающий многомерную фильтрацию данных зоотехнического учета (в частности, с использованием расстояний Махаланобиса) и учитывающий категорию хозяйства по уровню продуктивности. Отсутствие прикладных решений для Западной Сибири может приводить к системным ошибкам при ранжировании производителей, что и определяет необходимость проведения настоящего исследования.

Цель исследования

Оценить племенную ценность быков отечественной и зарубежной селекции по признакам молочной продуктивности их дочерей в условиях Западной Сибири.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Оценить влияние фактора «Категория хозяйства» на согласованность оценок племенной ценности быков-производителей, рассчитанных методами «дочери-сверстницы» и смешанной моделью «Производитель», в условиях Западной Сибири;

2. Оценить роль взаимодействия «генотип-среда» в изменчивости уровней удоя, жира и белка с использованием пороговой метрики Робертсона в хозяйствах разных категорий;

3. Построить биометрические модели племенной ценности быков-производителей отечественной и зарубежной селекции по признакам молочной продуктивности и провести сравнительный анализ полученных результатов с данными зарубежной оценки;

4. Оценить эффективность применения различных типов распределения отклика в моделях «Производитель» для обоснования оптимального метода оценки племенной ценности животных;

5. Оценить возможность применения многомерной фильтрации данных первичного зоотехнического учета на основе робастных расстояний Махаланобиса для повышения точности биометрических моделей племенной ценности животных по признакам молочной продуктивности;

6. Охарактеризовать генетическую структуру и степень сходства дочерей быков-производителей разного происхождения по микросателлитному профилю и определить степень сопряженности генетических и фенотипических дистанций.

Научная новизна исследования

Разработан методологический подход к категоризации племенных хозяйств с использованием медианного значения удоя базисной жирности в Западной Сибири.

Обоснован порог многомерной фильтрации записей на основе расстояний Махаланобиса, обеспечивающий баланс между количеством удаленных записей и качеством биометрических моделей.

Впервые в условиях Западной Сибири показана значимая роль взаимодействия «генотип-среда» в изменчивости уровней удоя и молочного белка. Установлено, что точность международных оценок племенной ценности быков зарубежной селекции различается в зависимости от категории хозяйства.

Установлено, что потомство быков отечественной селекции не формирует изолированной субпопуляции по микросателлитам и является частью популяции скота голштинской породы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии представлений об источниках изменчивости признаков молочной продуктивности дочерей быков отечественной и зарубежной селекции в условиях резко континентального климата Западной Сибири и в создаваемых на предприятиях разных условиях среды для раскрытия генетического потенциала животных. Полученные результаты уточняют вклад паратипических факторов в племенную ценность и расширяют методологические подходы к оценке взаимодействия «генотип-среда».

Практическая значимость работы определяется возможностью использования результатов исследования при совершенствовании региональных селекционных программ. Выводы и модели, описанные в работе, могут быть использованы племенными предприятиями, центрами искусственного осеменения и организациями селекционного учета Западной Сибири. Методы могут применяться при выборе быков-производителей,

корректировке схем подбора, верификации и очистке производственных баз данных перед расчетом племенной ценности. Практическую ценность имеет предложенный подход к фильтрации зоотехнических данных на основе многомерных расстояний Махаланобиса.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы послужил системный подход к оценке генетического потенциала крупного рогатого скота. Рассмотрение фенотипа как результата нелинейного взаимодействия наследственности и условий среды потребовало перехода от классических методов к многоэтапному биометрическому моделированию.

Информационной базой послужили выгрузки из информационно-аналитической системы зоотехнического учета «Селэкс», а также данные международной базы данных CDCB. Исследования проводились совместно с РИСЦ АО «Новосибирскагроплем».

Для решения поставленных задач применялся комплекс зоотехнических, статистических и генетических методов.

Первичный контроль качества и очистка больших массивов информации осуществлялись методом Тьюки, а также исключением данных, выходящих за пределы граничных значений.

Оценка племенной ценности и извлечение компонентов дисперсии выполнялись посредством построения смешанных линейных моделей быка-производителя и моделей норм реакций. Оптимизация моделей осуществлялась методом ограниченного максимального правдоподобия. Качество предсказательной способности алгоритмов проверялось с помощью пятикратной кросс-валидации. Все вычислительные процедуры и визуализация данных реализованы в среде статистического программирования R с использованием пакетов lme4, glmmTMB, MuMIn и др.

Генетический профиль животных рассматривался по микросателлитам, рекомендованным Международным обществом генетики животных ISAG. Внутрипопуляционное генетическое разнообразие оценивалось через показатели ожидаемой гетерозиготности и анализ редких аллельных вариантов (приватных аллелей). Генетическая дифференциация групп потомства определялась путем расчета дистанций Нея, Эдвардса и Рейнольдса. Последующая визуализация популяционной структуры выполнялась методом иерархической кластеризации и визуализацией в пространстве главных координат. Для выявления сопряженности между генетическими и фенотипическими дистанциями применялся тест Мантеля.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Фактор «Категория хозяйства» является определяющим фактором согласованности оценок племенной ценности быков-производителей, рассчитанных методами «дочери – сверстницы» и биометрическими моделями «Производитель». В хозяйствах с высокой молочной продуктивностью (Категория 2) обеспечивается высокая сопряженность результатов обоих методов по рассматриваемым признакам молочной продуктивности, тогда как в хозяйствах с продуктивностью ниже медианного уровня (Категория 1) достоверная связь сохраняется только по количеству жира;

2. Взаимодействие «генотип-среда» по удою и выходу молочного белка характеризуется снижением уровня метрики Робертсона ниже критического порога ($r_g < 0,80$) в условиях хозяйств разных категорий, что свидетельствует о значимой роли взаимодействия «генотип – среда»;

3. Рассчитанные оценки племенной ценности с помощью смешанных моделей «Производитель» обладают достоверно более высокой прогностической способностью для сибирской популяции молочного скота по сравнению с международными оценками;

4. Применение смешанных линейных моделей «Производитель» с нормальным типом распределения отклика при прогнозировании признаков молочной продуктивности является оптимальным. Использование моделей с лог-нормальным и гамма-распределением не обеспечивает преимуществ по предсказательной способности, незначительно уступая линейным моделям;

5. Метод многомерной фильтрации зоотехнических данных на основе робастных расстояний Махаланобиса устраняет завышение аддитивной генетической дисперсии и смещение в оценках коэффициента наследуемости h^2 , обеспечивая оптимальный порог нормализации распределения остатков моделей при сохранении 85 % записей;

6. Установлено, что сибирская популяция голштинского скота характеризуется оптимальным генетическим разнообразием, при этом выявлена низкая статистически достоверная степень сопряженности генетических и фенотипических дистанций по молочной продуктивности, выраженная у потомков быков зарубежной селекции.

Таким образом, исследование направлено на решение важного для современной селекционной практики вопроса: в какой мере высокий генетический потенциал, заявленный для быков отечественной и зарубежной селекции, способен реализоваться в природно-производственных условиях Западной Сибири и какие методы позволяют объективно оценить этот процесс.

Степень достоверности результатов и апробация результатов исследования

Степень достоверности обеспечена объемом проанализированного эмпирического материала. Исходные данные включали 21787 записей.

Отобраны и применены биометрические методы, а также методы популяционной генетики. Анализ данных реализован в среде статистического программирования R с использованием дополнительных библиотек для построения смешанных моделей и робастного анализа. Анализ генетической структуры осуществлялся по микросателлитам, рекомендованным ISAG. Статистическая надежность биометрических моделей подкрепляется результатами пятикратной кросс-валидации.

Результаты исследований обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития ветеринарной медицины, зоотехнии и биотехнологии» (Рязань, 2025), «Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии, инновации» (Пермь, 2025) и IV Международной научно-практической конференции «Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков» (Москва, 2026).

Публикации результатов исследований

По теме диссертационного исследования опубликовано 5 научных работ. Все они вышли в ведущих рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки Российской Федерации. Работы опубликованы в специализированных изданиях «Молочное и мясное скотоводство», «Зоотехния», а также «Вестник НГАУ».

В трех публикациях соискатель является первым автором. Две работы выполнены в соавторстве в рамках исследований по верификации первичного учета и научному обоснованию селекционно-племенной работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация представлена на 142 страницах компьютерного текста. Текст иллюстрирован 25 таблицами, 20 рисунками и содержит 4 приложения. Список использованной литературы включает 170 источников, в том числе 52 на иностранном языке.

Работа состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием материалов и методов, главы результатов собственных исследований, заключения, библиографического списка и приложений.

Личный вклад автора

Соискателем проведен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме работы. Автором осуществлена обработка первичной зоотехнической информации в восьми племенных хозяйствах Западной Сибири, выполнена процедура построения, валидации и математической очистки массивов данных. Написание программного кода на языке R для вычисления селекционных дифференциалов, построение смешанных линейных моделей быка-производителя, оценка экологической пластичности генотипов, обработка записей микросателлитного профиля выполнялись соискателем также единолично.

В работах, опубликованных в соавторстве, диссертанту принадлежит ведущая роль в написании программного кода на языке R и математической обработке данных; постановка задач и обсуждение промежуточных результатов проводились коллегиально. Экстраполяция методов на генеральную совокупность, построение моделей и формирование итоговых выводов диссертации выполнены автором единолично.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор литературы

В главе приведен аналитический обзор направлений развития молочного скотоводства. Отмечается, что рост продуктивности сопряжен с адаптационной характеристикой животных, что важно учитывать в природно-климатических условиях Западной Сибири. Использование племенного материала зарубежной селекции связано с ограничениями, обусловленными эффектом взаимодействия «генотип-среда». Вследствие этого международная оценка быков-производителей может не совпадать с их фактической племенной ценностью.

Для расчета оценок быков-производителей на территории Западной Сибири рассматривается методологический аппарат на базе алгоритмов семейства BLUP и моделей норм реакций. Подчеркивается значимость генетического анализа для сохранения разнообразия местного аллелофонда. При этом сдерживающим фактором для использования современных методов оценки является качество баз данных первичного зоотехнического учета. В связи с этим, актуальной задачей является поиск методов контроля данных первичного зоотехнического учета.

Обобщение отечественного и мирового опыта позволило установить, что применение современных методов оценки племенной ценности целесообразно и должно сопровождаться проверкой качества данных. Систематизация существующих подходов позволила определить методику проводимых исследований.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая схема проведенного исследования представлена на рисунке 1.

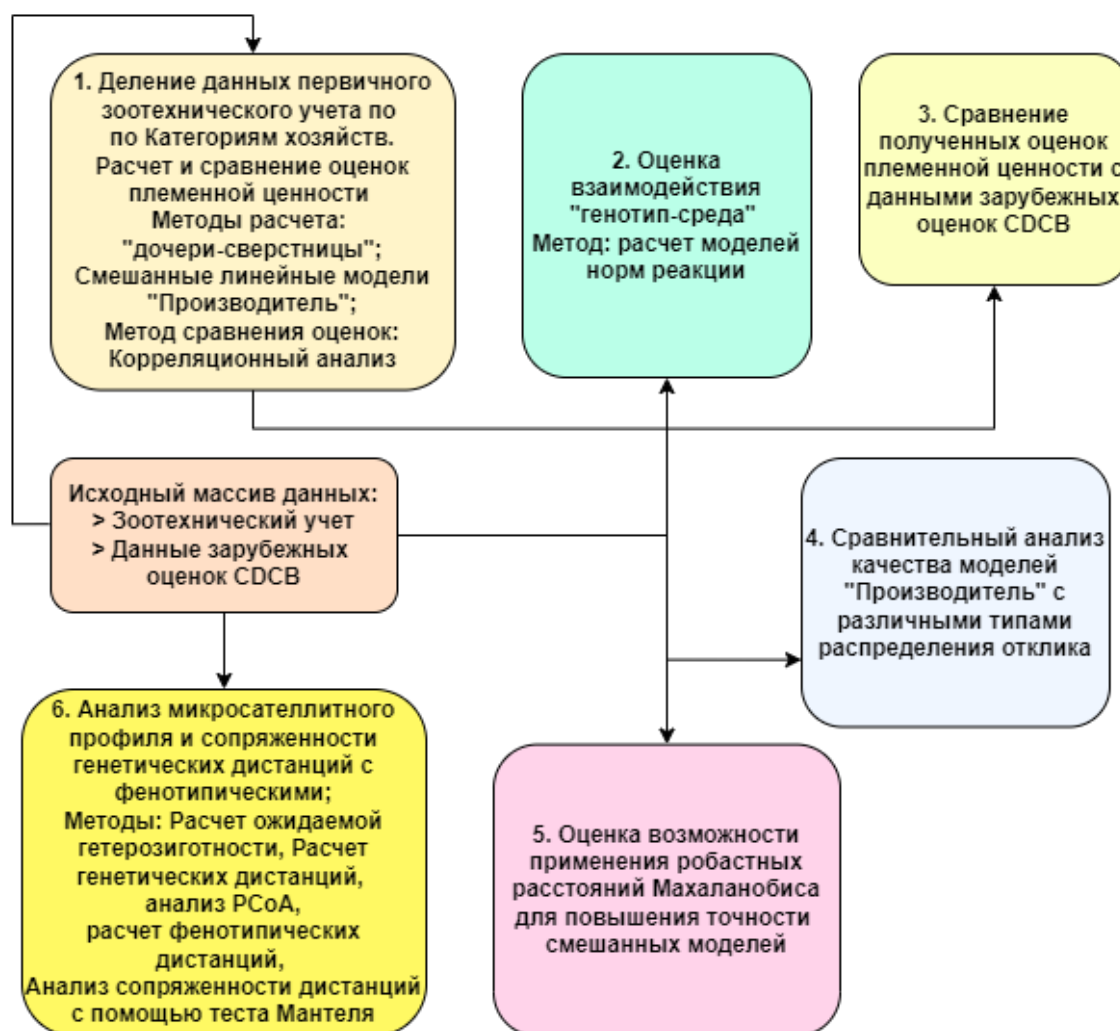


Рисунок 1 – Схема исследований

В исследовании использовались данные первичного зоотехнического учета информационно-аналитической системы «Сэлэкс» по племенным хозяйствам региона. Выборка была представлена 21787 записями по результатам 1-й лактации. Уровень продуктивности дочерей быков корректировался на уровень базового года и сезон отела (зима 2021 года). На скорректированных показателях продуктивности проводился расчет селекционных дифференциалов по удою, молочному жиру и белку. Селекционные дифференциалы быков-производителей определяли методом сравнения продуктивности дочерей с их сверстницами. Для каждой оцениваемой дочери формировали индивидуальную группу сверстниц, отелившихся в том же стаде в интервале плюс-минус 15 дней от даты отела. Для расчета смешанной модели «Производитель» корректировка данных не проводилась. Для сопоставления рассчитанных селекционных дифференциалов с международными оценками использовали базу данных CDCB.

С целью изучения нормы реакции потомства быков на условия среды общая выборка делилась на две категории, различающиеся по уровню продуктивности хозяйств, к которому относилась особь. В качестве характеристики продуктивности использовали показатель удою, стандартизированный путем пересчета на молоко базисной жирности (3,4%). Данные из хозяйств с медианным значением удою ниже медианного по общей выборке относили к категории 1, а со значением выше к категории 2. В полученных

категориях рассчитывались селекционные дифференциалы и сравнивались с зарубежной оценкой.

Племенную ценность быка (EBV) рассчитывали посредством смешанной линейной модели «Производитель» по удою, молочному жиру и белку. В модель вводились случайные эффекты быка-производителя и комплексный фактор среды «стадо-год-сезон» (HYS). В качестве фиксированных эффектов учитывались происхождение быка, категория хозяйства, а также ковариаты: возраст первого плодотворного осеменения, длительность сервис-периода и количество дойных дней в виде ортогональных полиномов второй степени.

Для количественной оценки взаимодействия «генотип-среда» применялись модели норм реакций со случайным наклоном, позволяющие рассчитать генетическую корреляцию признаков в разных категориях хозяйств по методу А. Робертсона [Robertson, 1959].

Для обоснования оптимального типа распределения отклика проводилось сравнение линейной смешанной модели (нормальное распределение) с обобщенными моделями (лог-нормальное и гамма-распределение) на основе оценок качества моделей.

С целью повышения точности биометрических моделей применялся метод многомерной фильтрации данных на основе робастных расстояний Махаланобиса. Процедура включала последовательное отсечение записей шагом 5% с последующей диагностикой качества моделей: оценкой нормальности распределения остатков (критерий Андерсона-Дарлинга), стабильности коэффициента наследуемости h^2 и метрик кросс-валидации, что позволило определить порог сохранения данных.

Генетическая структура популяции оценивалась по микросателлитным (STR) локусам, рекомендованным ISAG. Рассчитывались показатели ожидаемой гетерозиготности H_e , выявлялись редкие аллельные варианты (приватные аллели). Для оценки сопряженности генотипа и фенотипа строились матрицы генетических дистанций (методы Нея, Рейнольдса, Эдвардса) и фенотипических дистанций (евклидово расстояние). Статистическая значимость взаимосвязи между матрицами проверялась с помощью теста Мантеля (коэффициент ранговой корреляции Спирмена, 9999 перестановок) как для общей выборки, так и отдельно для групп отечественной и зарубежной селекции

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Влияние категории хозяйства на согласованность методов оценки племенной ценности

Анализ согласованности оценок, рассчитанных методами «дочери-сверстницы» и смешанной моделью «Производитель», выявил существенные различия в разрезе категорий хозяйств (рисунок 2). В предприятиях с высоким уровнем молочной продуктивности (Категория 2) обеспечивается высокая согласованность рассчитанных оценок племенной ценности с данными по молочной продуктивности дочерей. По удою корреляция составила $r_s = 0,890 \pm 0,152^{***}$, по массе жира $r_s = 0,875 \pm 0,161^{***}$, по массе белка $r_s = 0,884 \pm 0,156^{***}$. В хозяйствах с продуктивностью ниже медианного значения (Категория 1) связь сохраняется только по молочному жиру ($r_s = 0,637 \pm 0,257^*$).

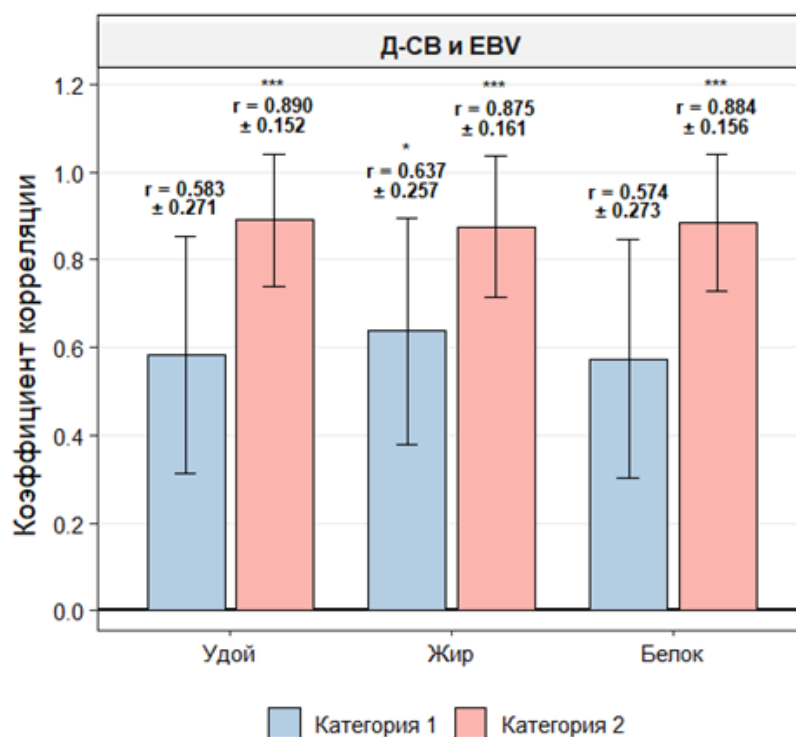


Рисунок 2 – Корреляции оценок, полученных методами «дочери сверстницы» и по моделям «Производитель» в разрезе категорий хозяйств

Полученные результаты свидетельствуют, что в условиях хозяйств Категории 2 генетический потенциал реализуется более стабильно, что обеспечивает высокую воспроизводимость оценок разными методами. В хозяйствах, относящихся к 1-й Категории, паратипические факторы способны вносить искажения, снижая согласованность между фенотипической оценкой и прогнозом моделей.

2. Оценка взаимодействия «генотип-среда» и экологической пластичности генотипов

Для количественной оценки экологической пластичности генотипов были построены модели норм реакций. Установлено, что коэффициенты генетической корреляции r_g по признаку удоя (0,716) и белка (0,742) оказались ниже порогового значения 0,8 (таблица 1). Это подтверждает наличие выраженного взаимодействия «генотип – среда», при котором прогнозируемая передающая способность РТА одних и тех же производителей меняется в зависимости от технологического уровня хозяйства. При этом для признака «Выход молочного жира», корреляция оценок между категориями хозяйств оказалась наиболее высокой. Это свидетельствует о том, что по данному признаку в проведенном исследовании потомство быков обладает большей устойчивостью к изменению категории хозяйства.

Таблица 1 – Оценка эффекта взаимодействия генотипа и среды

Селекционируемый признак	r_g
Удой за 305 дней лактации, кг	0,716

Выход молочного белка, кг	0,742
Выход молочного жира, кг	0,862

Полученные результаты подтверждают наличие выраженного эффекта «генотип – среда», при котором ранг и рассчитанная передающая способность РТА быков-производителей существенно меняются в зависимости от технологического уровня предприятия. В то же время по выходу молочного жира корреляция составила 0,862, что свидетельствует о его меньшей подверженности влиянию категории хозяйства.

Математическое моделирование индивидуальных норм реакции, представленное в данном разделе, реализовано диссертантом единолично. Интерпретация результатов выполнена диссертантом самостоятельно.

3. Сравнительный анализ рассчитанных оценок племенной ценности с помощью моделей «Производитель» и международных оценок CDCB

Построение биометрических моделей «Производитель» позволило получить оценки племенной ценности на данных по предприятиям Западной Сибири. Сравнение рассчитанных оценок с международными (CDCB) выявило ограниченную прогностическую способность последних в условиях Западной Сибири (рисунок 3).

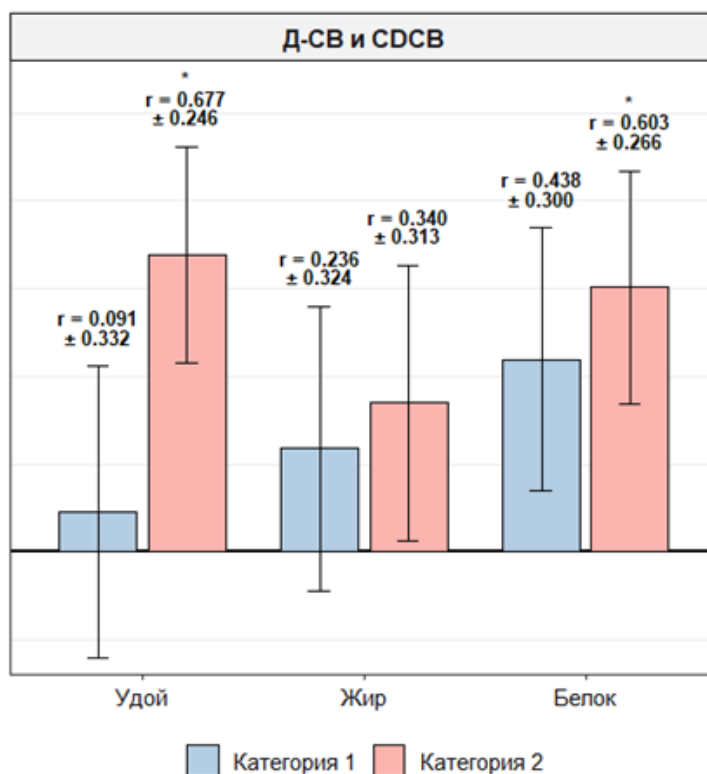


Рисунок 3 – Корреляции оценок, полученных с помощью моделей «Производитель» и зарубежных оценок CDCB

Наиболее выраженные различия проявляются в зависимости от категории хозяйства. В предприятиях 2-й категории сохраняется умеренная достоверная связь между локальными оценками и индексами CDCB по удою и уровню белка (r_s составил 0,677 и 0,603 соответственно). Однако в хозяйствах 1-й категории корреляция с иностранными

оценками практически нивелируется, а высокий разброс стандартных ошибок делает прогнозирование невозможным.

Полученные результаты подтверждают, что прямое использование зарубежных оценок в условиях Западной Сибири ведет к смещённому прогнозу.

4. Обоснование типа распределения отклика и сравнительная оценка эффективности моделей «Производитель»

Предварительный анализ соответствия эмпирических данных теоретическим распределениям показал, что для признаков удоя, массы жира и белка нормальное распределение характеризуется наименьшими значениями информационных критериев AIC и BIC по сравнению с лог-нормальным и гамма-распределениями.

На основании полученных результатов были построены смешанные модели «Производитель» с тремя типами распределения отклика. Сравнительный анализ предсказательной способности моделей методом пятикратной кросс-валидации не выявил существенных расхождений. Разница в коэффициентах детерминации R_{pred}^2 между типами моделей не превышала 0,003, а по коэффициенту наследуемости h^2 составляла около 0,03.

Модели с лог-нормальным распределением характеризовались завышением коэффициента наследуемости на 0,02 – 0,03, что можно отнести к погрешности, возникающей при логарифмировании исходных данных.

Таким образом, классическая линейная смешанная модель с нормальным распределением отклика признана оптимальной для оценки племенной ценности по признакам молочной продуктивности.

5. Повышение точности биометрических моделей путем многомерной фильтрации данных методом Махаланобиса

Для устранения смещения оценок EBV, вызванного выбросами в первичном зоотехническом учете, применен метод робастной фильтрации на основе квадратов расстояний Махаланобиса. Итеративное отсечение аномальных записей (с шагом 5%) позволило выявить оптимальный порог очистки.

Важным критерием выбора порога послужила оценка распределения остатков модели (рисунок 4). Применение критерия Андерсона-Дарлинга показало, что удаление 10–15 % крайних наблюдений сопровождалось уменьшением его уровня. При пороге отсечения 85 % нулевая гипотеза о нормальности распределения не отвергалась. При этом эксцесс остатков демонстрировал тенденцию к нулевому уровню, а асимметрия сохраняла статистическую незначимость на протяжении всей процедуры очистки.

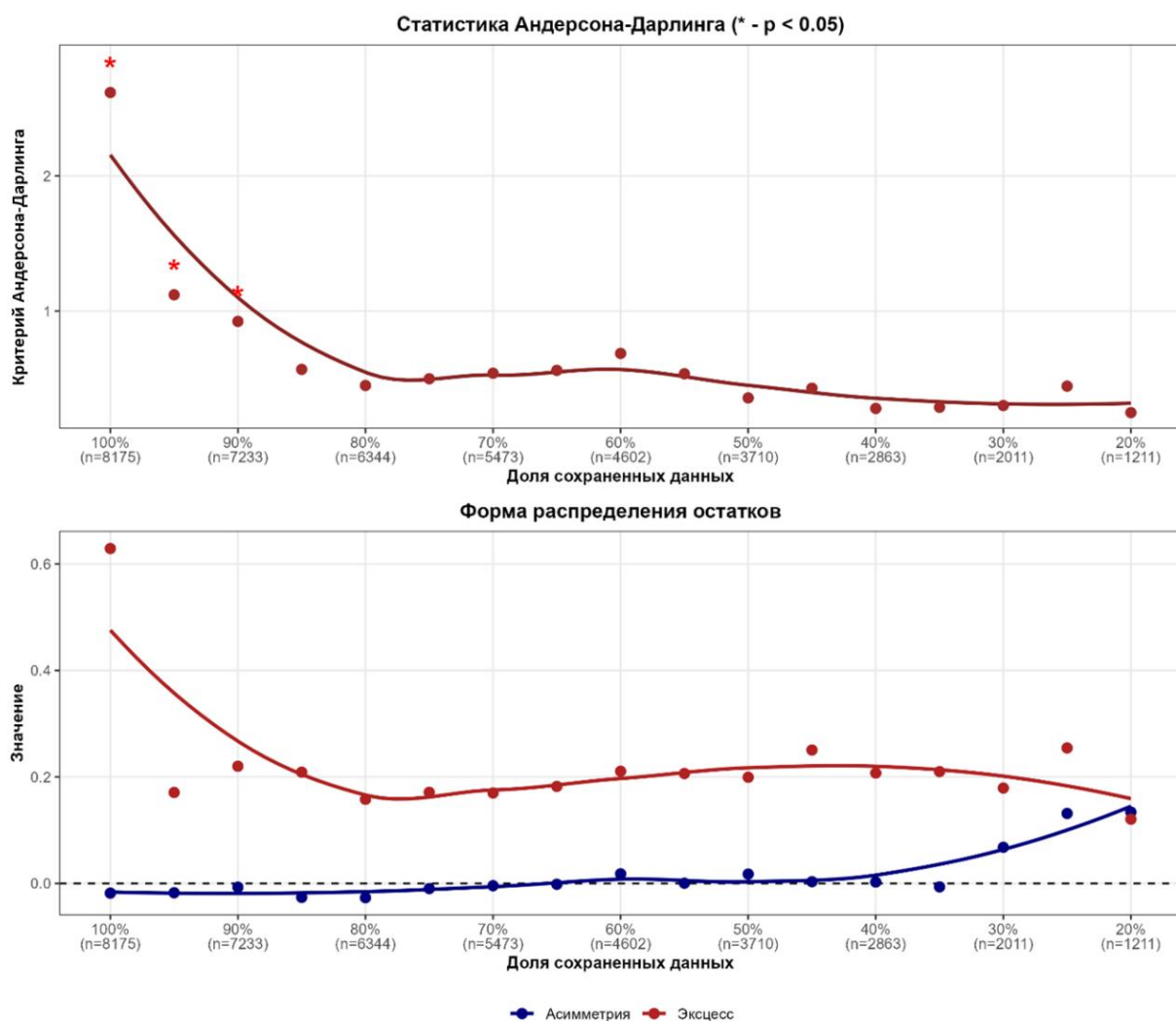


Рисунок 4 – Результаты анализа остатков смешанных линейных моделей в зависимости от доли сохраненных данных

Анализ изменчивости уровня коэффициента наследуемости h^2 и предсказательной способности R_{pred}^2 показал монотонное снижение обоих показателей по мере усечения выборки (рисунок 5). В исходной базе данных h^2 составлял 0,235, что может свидетельствовать о завышении аддитивной генетической дисперсии за счет многомерных выбросов при сохранении 85% наблюдений коэффициент наследуемости находился на биологически обоснованном уровне 0,161.

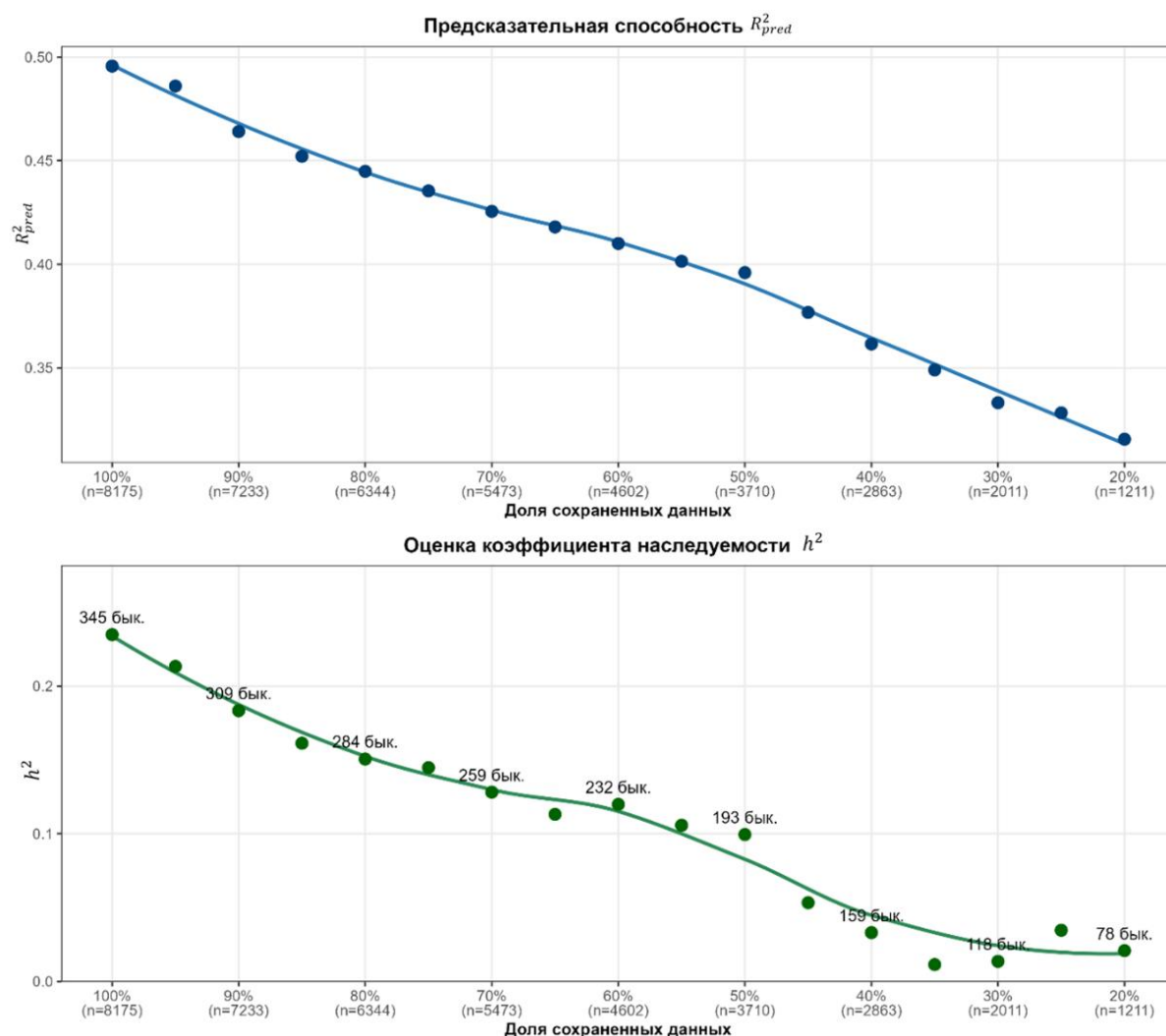


Рисунок 5 – Значения коэффициента наследуемости и предсказательной способности моделей кросс-валидации в зависимости от доли сохраненных данных

Чрезмерная фильтрация, данных более 85% признана нецелесообразной, так как ведет к падению h^2 ниже 0,10, потере статистической мощности (число оцениваемых быков сокращается с 345 до менее, чем 280 голов) и нарушению структуры данных. Таким образом, порог сохранения 85% наблюдений обеспечивает оптимальный компромисс между математической адекватностью модели и целостностью данных.

6. Генетическая структура популяции и сопряженность генотипических и фенотипических дистанций

Анализ микросателлитного профиля дочерей быков-производителей позволил определить уровень внутрипопуляционного генетического разнообразия (таблица 2). Значения ожидаемой гетерозиготности H_e варьировали в пределах 0,536–0,665, что свидетельствовало об отсутствии выраженной генетической депрессии и сохранении адаптивного потенциала исследуемой популяции. В сумме в популяции идентифицировано 14 редких аллельных вариантов. Наибольшее число которых сосредоточено у потомства быков Форчун и Кикболл, что указывает на сохранение уникальных генетических вариантов в отдельных родственных группах.

Таблица 2 – Внутрипопуляционное генетическое разнообразие по микросателлитным локусам

Показатель	Значение
Число исследуемых субпопуляций быков	45
Число редких аллельных вариантов	14
Число анализируемых локусов	10
H_e	0,536 – 0,665

Выявленные редкие аллельные варианты (приватные аллели) в рамках данного исследования следует рассматривать как потенциальные. Для их окончательной верификации и использовании в рамках программ крупномасштабной селекции требуется более масштабное исследование с применением методов секвенирования нового поколения.

Визуализация генетических дистанций методом главных координат показала, что потомство быков отечественной селекции не формирует изолированного кластера, а интегрировано в общую структуру голштинизированной популяции Западной Сибири (рисунок 6). Отечественные производители образуют компактную группу в верхней части координатного пространства, что отражает общность их происхождения и направленности локальной селекционной работы. При этом наблюдается зона перекрывания с частью зарубежных производителей, что подтверждает высокую степень ассимиляции отечественного генофонда в результате голштинизации.

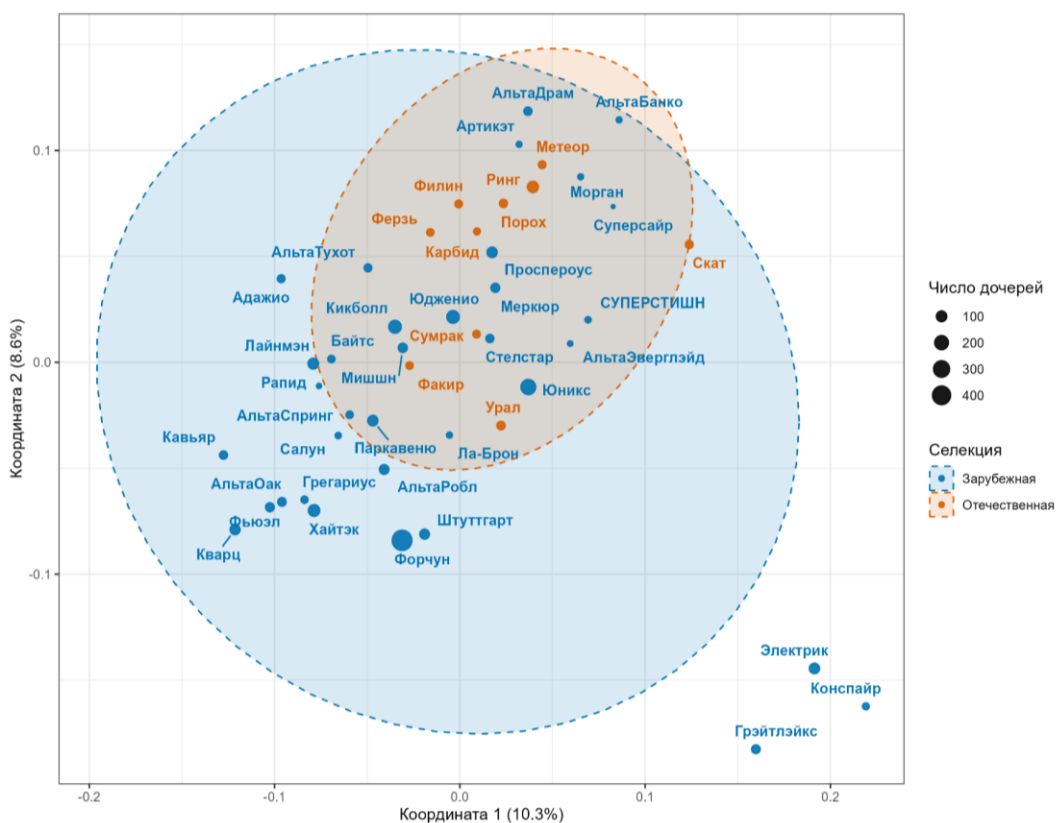


Рисунок 6 – Представление генетических дистанций (метод Эдвардса) методом главных координат

Заключительным этапом стала оценка сходимости генетической структуры с фенотипическими дистанциями. Применена процедура теста Мантеля. Анализ общей выборки выявил положительную, но низкую взаимосвязь между генетическими и фенотипическими дистанциями. Характер корреляции существенно зависел от выбранного алгоритма оценки генетических расстояний. Дистанции Эдвардса и Нея имели достоверную сопряженность с удоем, выходом молочного жира и белка при уровне значимости $p < 0,05$ (коэффициенты r_M варьировали от 0,111 до 0,182). Дистанции Рейнольдса находились в сопряженности только с показателем количества молочного жира ($r_M = 0,111^*$, $p = 0,0429$).

Раздельный анализ популяций по происхождению быков-производителей позволил установить различия в сопряженности изучаемых признаков (таблица 3). Так, в группе потомков быков зарубежной селекции статистически значимая корреляция генетических и фенотипических дистанций сохранилась исключительно для показателей выхода молочного жира и белка ($r_M = 0,141^*$ и $0,133^*$ соответственно), тогда как по удою достоверной взаимосвязи не выявлено. В выборках потомства отечественных быков ни один из показателей продуктивности не имеет статистически значимой сопряженности с генетическими дистанциями.

Таблица 3 – Сходимость генетических и фенотипических дистанций потомства быков отечественной и зарубежной селекции

Происхождение быка	Показатель	n	r_M	p
Зарубежная селекция	Удой, кг	35	0,111	0,0826
	Жир, кг	35	0,141	0,0433
	Белок, кг	35	0,133	0,0464
Отечественная селекция	Удой, кг	10	0,067	0,3485
	Жир, кг	10	0,076	0,3233
	Белок, кг	10	0,114	0,2591

Таким образом, генетическая структура исследуемой популяции не демонстрирует обособленности отечественных производителей. При этом сопряженность генетических дистанций с продуктивностью слабая и неоднородная. Достоверные связи отмечаются лишь у зарубежных быков. Это может быть связано с тем, что количество рассматриваемых зарубежных производителей значительно выше по сравнению с российскими, что и определяет их большую консолидированность по уровню генетического потенциала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что селекционная работа в молочном скотоводстве Западной Сибири должна строиться на сочетании трех обязательных компонентов: генетического анализа, многоуровневой верификации исходных данных и учета категории хозяйства при расчете племенной ценности быков-производителей. Данный подход позволяет перейти от использования иностранных оценок к научно обоснованному выбору быков, способных обеспечить рост продуктивности в конкретных хозяйственных условиях. По результатам работы сформулированы следующие выводы:

1. Согласованность оценок племенной ценности быков-производителей, рассчитанных методами «дочери-сверстницы» и смешанными моделями «Производитель», определяется фактором «Категория хозяйства». На предприятиях с высоким уровнем молочной продуктивности (Категория 2) обеспечивается высокая согласованность рассчитанных оценок племенной ценности с данными по молочной продуктивности дочерей. По удою корреляция составила $r_s = 0,890 \pm 0,152^{***}$, по массе жира $r_s = 0,875 \pm 0,161^{***}$, по массе белка $r_s = 0,884 \pm 0,156^{***}$. В хозяйствах с продуктивностью ниже медианного значения (Категория 1) связь сохраняется только по молочному жиру ($r_s = 0,637 \pm 0,257^*$).
2. Выявлено наличие выраженного взаимодействия «генотип-среда» по ключевым признакам молочной продуктивности. Корреляции r_g между категориями хозяйств по удою и массе белка составили 0,716 и 0,742 соответственно, что ниже порога Робертсона ($r_g < 0,8$);
3. Применение биометрических моделей обеспечивает несмещённую интерпретацию племенной ценности производителей в условиях животноводческих предприятий Западной Сибири. Международные оценки (в частности, в базах данных CDCB) характеризуются ограниченной прогностической способностью для рассматриваемой популяции;
4. Сравнительный анализ критериев предсказательной способности смешанных моделей «Производитель» показал отсутствие существенных расхождений в их точности при разных типах распределения отклика. Для моделей с применением нормального, лог-нормального и гамма-распределения показатели кросс-валидации и внутренние параметры варьируются в незначительных пределах (разница в значениях R_{pred}^2 не превышала 0,003, а по h^2 не более 0,032);
5. Применение метода многомерной фильтрации зоотехнических данных на основе робастных расстояний Махаланобиса устраняет завышение аддитивной генетической дисперсии и смещение в оценках наследуемости h^2 . Оптимальным порогом фильтрации по признакам молочной продуктивности является сохранение 85 % наблюдений, при котором распределение остатков модели перестает значимо отличаться от гауссовского, обеспечивая более точную оценку племенной ценности быков-производителей в условиях Западной Сибири;
6. Установлен уровень ожидаемой гетерозиготности по микросателлитам ($H_e = 0,536 - 0,665$), указывающий на оптимальный уровень генетического разнообразия. Обнаружено 14 редких аллельных вариантов (приватных аллелей) у потомков отдельно взятых производителей;
7. Выявлена значимая степень сопряженности генетических и фенотипических дистанций в сибирской популяции голштинского скота, достигающая наибольшей величины по выходу молочного жира по методу Эдвардса ($r_M = 0,182^*$). При анализе таких дистанций по потомкам быков отечественного и зарубежного происхождения такая связь выявлена только у потомков, полученных от быков иностранной селекции по уровню жира ($r_M = 0,141^*$) и белка ($r_M = 0,133^*$). Отсутствие аналогичной связи у потомства отечественных быков связано с ограниченным количеством групп дочерей ($n = 10$), что усложняет возможность выявления статистически значимых корреляций;

8. Показана необходимость перехода от прямого использования зарубежных оценок к региональной системе прогнозирования племенной ценности на основе расчета локальных популяционных параметров и многомерной фильтрации уровней признаков молочной продуктивности.

Предложения

Значимость работы подтверждается возможностью прямого использования ее результатов для оптимизации крупномасштабной селекции молочного скота в Западной Сибири. Результаты могут быть использованы племенными заводами, репродукторам и региональным информационно-селекционными центрами. На основании выявленных генетико-статистических закономерностей предлагается внедрить в производственную практику следующий комплекс мер:

1. Осуществлять многомерную фильтрацию первичных зоотехнических баз данных перед расчетом племенной ценности животных. Традиционная одномерная очистка массивов является недостаточной. Рекомендуется внедрить в используемое программное обеспечение возможность поиска аномальных значений признаков отбора на основе дистанции Махаланобиса. Оптимальным порогом сохранения репрезентативности предлагается считать 85% записей. Данный подход позволит обнаруживать скрытые ошибки учета. Метод способен предотвратить искусственное завышение генетической дисперсии и обеспечить более высокую точность моделей.
2. Внедрить дифференцированный подход к закреплению быков-производителей на основе предварительной категоризации хозяйств по уровню молочной продуктивности с использованием медианного значения молока базисной жирности. Обоснованием этому служит выраженная роль взаимодействия «генотип-среда».

Перспективы дальнейшей разработки темы

Выполненное исследование закладывает методологическую основу для перехода к национальной системе оценки генетического потенциала крупного рогатого скота молочного направления продуктивности с учётом особенностей среды на животноводческих предприятиях Западной Сибири. Дальнейшие научные и практические изыскания в данном направлении целесообразно развивать по следующим векторам:

1. Разработанный подход многомерной фильтрации данных зоотехнического учета на основе расстояний Махаланобиса имеет потенциал для интеграции в виде программных модулей в действующие информационно-аналитические системы. Это позволит осуществлять премодерацию и очистку данных в автоматическом режиме на уровне регионов.
2. В дальнейших исследованиях предполагается дополнить модели оценки племенной ценности информацией о величине продуктивного долголетия, а также устойчивости к заболеваниям.
3. Опираясь на рассчитанные оценки племенной ценности и роли взаимодействия типа «генотип - среда», перспективным видится создание селекционного индекса по аналогии с международными TPI, LPI, NM\$, RZ€ и др., которые учитывают региональные экономические показатели.

**Список основных работ, опубликованных
по теме диссертации
в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. **Жигулин, Т. А.** Эффективность применения быков зарубежной селекции по признакам жирномолочности в племенных предприятиях Западной Сибири / Т. А. Жигулин, Е. В. Камалдинов, П. Н. Пальчиков // Зоотехния. – 2026. – № 2. – С. 27-29.
2. **Жигулин, Т. А.** Реализация генетического потенциала быков зарубежной селекции в племенных предприятиях Западной Сибири / Т. А. Жигулин, Е. В. Камалдинов, П. Н. Пальчиков // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2025. – № 4 (77). – С. 150-160.
3. Эффективность методов Isolation forest и расстояний Махаланобиса в обнаружении аномалий данных зоотехнического учета / **Т. А. Жигулин**, М. А. Шишкин, А. Ф. Петров, Е. В. Камалдинов // Молочное и мясное скотоводство. – 2025. – № 1. – С. 51-55.
4. Научно-теоретическое обоснование системы совершенствования селекционно-племенной работы в молочном скотоводстве Новосибирской области / О. В. Богданова, Е. В. Камалдинов, С. Г. Куликова, В.В. Гарт, А.Ф. Петров, К.Н. Нарожных, **Т.А. Жигулин**// Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2023. – № 2 (67). – С. 149-155.
5. Достоверность данных первичного зоотехнического учёта в молочном скотоводстве / Е. В. Камалдинов, А. Ф. Петров, К. С. Шатохин, К.Н. Нарожных, В.Г. Маренков, **Т.А. Жигулин** [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2022. – № 2 (63). – С. 76-83.

В других изданиях

1. **Жигулин, Т. А.** Сравнительная оценка племенной ценности быков зарубежной селекции по удою дочерей за 305 дней лактации / Т. А. Жигулин // Перспективы развития ветеринарной медицины, зоотехнии и биотехнологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Рязань, 30 окт. 2025 г. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, 2025. – С. 65–70.
2. **Жигулин, Т. А.** Сравнительный анализ прогнозируемой и фактической племенной ценности быков зарубежной селекции в условиях Западной Сибири / Т. А. Жигулин // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии, инновации: материалы Международной научной конференции, Пермь, 10–14 нояб. 2025 г. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2025. – С. 182–186.
3. **Жигулин, Т. А.** Применение метода дистанций Махаланобиса для анализа данных зоотехнического учета / Т. А. Жигулин, М. А. Шишкин // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: материалы 4-й (IV) Международной научно-практической конференции, Москва, 27 февр. 2026 г. – Москва: АНО ДПО «Университет ИТБО», 2026. – С. 108–113.