

На правах рукописи

Савинов Антон Васильевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПЛЕМЕННЫХ
КАЧЕСТВ СВИНЕЙ ПО КОМПЛЕКСУ ПРИЗНАКОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре разведения, генетики и биотехнологии животных ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель

Алтухова Наталья Сергеевна,
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
доцент кафедры разведения, генетики и
биотехнологии животных ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

Ермилов Александр Николаевич,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
профессор кафедры разведения, селекции и
генетики сельскохозяйственных животных ФГБОУ
ДПО «Российская академия менеджмента и
аналитики в животноводстве»

Карпушкина Татьяна Вячеславовна,

кандидат биологических наук, советник отдела
племенных ресурсов Департамента
животноводства и племенного дела Министерства
сельского хозяйства Российской Федерации

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный аграрный
университет имени императора Петра I»

Защита состоится 24 сентября 2025 г. в 11:30 на заседании диссертационного совета 35.2.030.10 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.10,
кандидат биологических наук

Заикина
Анастасия Сергеевна

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Интенсификация свиноводства требует комплексного подхода к организации основных этапов селекционной работы, основанного на современных передовых научных методах прогноза племенной ценности, отбора и подбора животных. Наиболее важным этапом для генетического совершенствования хозяйственно-полезных признаков в селекционируемых популяциях животных является прогноз их племенной ценности.

В странах с развитым животноводством с середины 80-х годов прошлого столетия для прогноза племенной ценности животных активно применяется метод наилучшего линейного несмещенного прогноза – BLUP (Best linear unbiased prediction). Данный метод основан на решении уравнения смешанной модели, который позволяет нивелировать влияние паратипических факторов и с большой точностью оценить племенную ценность животного на основе всей имеющейся информации о собственной продуктивности, продуктивности предков и потомков.

За последние десятилетия в мировой практике разведения животных внедряются методы геномной селекции (GBLUP – Genomic best linear unbiased prediction, ssGBLUP – Single-step genomic best linear unbiased prediction), основанные на использовании молекулярно-генетических маркеров и позволяющие оценить племенную ценность животных до получения от них потомства.

Комплексная оценка племенной ценности производится сразу по нескольким экономически важным показателям продуктивности индивидуумов на основании построения уравнения селекционного индекса, учитывающего селекционную и экономическую значимость признаков в популяции. Данные методики доказали свою эффективность в различных отраслях животноводства.

В Российской Федерации на сегодняшний день оценка племенных качеств животных в свиноводстве проводится посредством бонитировки и регламентируется приказом МСХ РФ №179 от 7 мая 2009 года с изменениями на 30 октября 2015 года «Об утверждении Порядка и условий проведения бонитировки племенных свиней». Племенная ценность оценивается на основании фенотипических показателей животных, что не согласуется с точностью и эффективностью современных методов, используемых в мировой практике. Методы генетического и геномного прогноза племенной ценности животных в Российской Федерации применяются редко и, в основном, за счет использования вычислительных ресурсов зарубежных племенных свиноводческих компаний. Зависимость от иностранных селекционных программ не может способствовать всестороннему развитию племенного свиноводства России и влечет к неустойчивости продовольственной безопасности страны. В то же время, качество племенных ресурсов (материала), завозимых из других стран, не всегда соответствует заявленному и не может выступать основой племенного ядра, что приводит к необходимости регулярной покупки иностранных генетических ресурсов для производства отечественной товарной свинины.

Таким образом, разработка и внедрение национальных селекционных программ в племенные свиноводческие хозяйства, основанных на современных методах комплексной оценки племенной ценности и геномных технологиях, является важным условием для обеспечения продовольственной безопасности страны и конкурентоспособности российских свиноводческих предприятий.

Степень разработанности темы исследований. В Российской Федерации проведено значительное количество исследований по крупному рогатому скоту, направленных на изучение эффективности применения методологии BLUP и селекционного индекса, доказывающих эффективность данных методик. Также для крупного рогатого скота получены результаты апробации методов геномного прогноза племенной ценности и сравнения с традиционными методами прогноза.

В области свиноводства исследований, направленных на апробацию современных методов прогноза племенной ценности, проведено незначительно. Эффективность методологии BLUP в сравнении с отбором по фенотипу подтверждена в исследованиях Рудь А.И., Мельниковой Е.Е., Пархоменко Е.Г., и др.

Апробация геномного прогноза племенной ценности посредством метода ssGBLUP и комплексная оценка племенной ценности на основе построения уравнения селекционного индекса была осуществлена для породы крупная белая по репродуктивным, откормочным и мясным показателям (Мельникова Е.Е. и др. 2021, 2022), для породы дюрок – по показателям кормового поведения и конверсии корма (Отрадных П.И. и др. 2023, Контэ А.Ф. и др. 2022). В отношении породы ландрас проведена комплексная оценка по репродуктивным, мясным и откормочным показателям (Контэ А.Ф. и др. 2023).

Очевидно, что исследования, направленные на апробацию методов геномного прогноза племенной ценности, сравнение точности методов геномного прогноза с традиционными методами прогноза, разработку комплексной оценки племенной ценности свиней согласно теории построения селекционного индекса, предложенного L.Hazel (1943), на сегодняшний день являются насущной проблемой современной системы племенной работе в свиноводстве.

Цель и задачи исследований. Целью исследований являлась разработка и адаптация научно-обоснованной системы оценки племенной ценности свиней материнских пород йоркшир и ландрас по отдельным признакам продуктивности и их комплексу.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Сформировать базу данных фенотипических записей признаков продуктивности свиней пород йоркшир и ландрас, базу данных полногеномного генотипирования и родословной.
2. Определить влияние факторов, значимо влияющих на разнообразие селекционных признаков свиней и оптимизировать уравнения смешанной модели для оценки их племенной ценности.
3. Оценить селекционно-генетические параметры и вариантные компоненты признаков в исследуемых популяциях свиней.

4. Произвести прогноз племенной ценности признаков продуктивности животных методом BLUP Animal Model и геномный прогноз племенной ценности методом ssGBLUP.

5. Проанализировать точность прогнозов племенной ценности свиней, полученных разными методами.

6. Разработать и оптимизировать структуру селекционных индексов племенной ценности свиней по комплексу учтенных хозяйственно-полезных признаков.

7. Проанализировать процесс формирования селекционных групп свиней на основе отдельных признаков продуктивности, селекционного индекса и разной интенсивности отбора.

Научная новизна исследований. Впервые для закрытой популяции свиней пород йоркшир и ландрас в условиях ООО «Уфимский селекционно-гибридный центр» (Республика Башкортостан) разработаны оптимальные уравнения смешанного типа для оценки компонентов дисперсии и прогноза племенной ценности животных. Апробирован метод геномного прогноза племенной ценности ssGBLUP. Произведено сравнение точности геномного прогноза племенной ценности методом ssGBLUP с точностью прогноза племенной ценности методом BLUP AM. Разработана система комплексной оценки племенной ценности свиней на основе построения уравнений селекционных индексов для пород йоркшир и ландрас. Предложена схема двухэтапного отбора на основании оптимизированного уравнения селекционного индекса.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в повышении эффективности отбора свиней в селекционные группы на основе увеличения объективности и повышения достоверности результатов оценки их племенной ценности как по отдельным признакам, так и по комплексу селекционируемых признаков. Реализация результатов и технологий определения генетической ценности животных и обоснование целесообразности их применения в практике положены в основу оптимизации селекционной программы с закрытой популяцией свиней породы йоркшир и ландрас в условиях ООО «Уфимский селекционно-гибридный центр» Республики Башкортостан.

Методология и методы исследования. Материалом исследования послужили фенотипические показатели, информация о родословной и данные полногеномного генотипирования свиней породы ландрас и йоркшир. Оценка достоверности и уровня влияния факторов для построения уравнения смешанной модели проводилась на основе дисперсионного анализа. Расчет компонентов дисперсии осуществлялся с помощью метода AIREML. Прогноз племенной ценности свиней произведен с использованием метода наилучшего несмещенного линейного прогноза (модель животного) BLUP Animal Model, геномный прогноз племенной ценности – с помощью одношагового метода геномного наилучшего линейного несмещенного прогноза ssGBLUP. Комплексная оценка племенной ценности производилась путем построения уравнения селекционного индекса согласно базовым положениям индексной теории Л. Хейзела (L.Hazel, 1943). Обработка и анализ результатов осуществлялся посредством языков

программирования R и Python, расчет компонентов дисперсии и прогноз племенной ценности производился с помощью программного пакета BLUPF90.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа селекционно-генетических параметров закрытых популяций свиней породы йоркшир и ландрас;
- сравнительная характеристика методов оценки прогноза племенной ценности животных на основании родословной и данных полногеномного генотипирования;
- разработка структуры уравнения селекционного индекса племенной ценности свиней по комплексу признаков продуктивности;
- оптимизация структуры уравнения селекционного индекса племенной ценности свиней для отбора в селекционные группы при разных целях селекции;
- эффективность формирования селекционных групп свиней по селекционному индексу и их оценкой по отдельным признакам продуктивности.

Степень достоверности и апробация результатов. Исследования проведены на большом массиве данных о животных, включающем информацию об 11 поколениях свиней породы йоркшир и ландрас. При использовании исходных данных была проведена работа по логическому контролю информации на основе программного компьютерного обеспечения, разработанного нами. Исследованы биометрические показатели выборок, была проведена оценка значимости влияния факторов на разнообразие изученных в исследованиях признаков продуктивности (при помощи построения ANOVA-таблиц, по итогам оценки на базе использования критерия Фишера). Достоверность оценок племенной ценности животных, величин коэффициентов корреляции проводили на основе использования современного научно-методического комплекса расчета статистических характеристик создаваемых выборок биологических объектов, формируемых в процессе исследований.

Основные научные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на: Международной научно-практической конференции «Научно-практическое обеспечение интенсивного развития животноводства и кормопроизводства на современном этапе», (Алматы, 14–15 июня 2023 года); Международном научном симпозиуме, посвященном 150-летию со дня рождения выдающегося ученого в области зоотехнии академика Е.Ф. Лискуна «Достижения зоотехнической науки в решении актуальных задач животноводства и аквакультуры» (Москва, 2023); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (Москва, 2023); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича (Москва, 2024); Международной научно-практической конференции «Инновации, современные тенденции развития животноводства и зоотехнической науки: методы, технологии, экологическая безопасность производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (Саратов, 2025).

Публикация результатов исследований. По теме диссертационного исследования опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых

научных журналах, рекомендованных ВАК: «Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии» и «Аграрная наука».

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 129 страницах компьютерного текста и включает: введение, обзор литературы, материалы и методы исследований, результаты исследований, заключение, предложения производству, библиографический список и приложения. Диссертационная работа содержит 25 таблиц и 32 рисунка. Список литературы включает 212 источников, в том числе 160 - на иностранных языках.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужили записи о продуктивности свиней породы йоркшир и ландрас, принадлежащих ООО «Уфимский селекционно-гибридный центр» (г. Уфа, Республика Башкортостан). Животные были рождены в период с 2018 по 2024 гг. Общее поголовье породы йоркшир в анализируемых родословных составило 12704 хряка и 103296 свиноматок, в породе ландрас - 7603 хряка и 26192 свиноматки. Число фенотипических записей по данным опоросов для породы йоркшир составило 31051 по многоплодию и 7037 по крупноплодности; для породы ландрас – 6073 и 1303, соответственно. Показатели среднесуточного прироста были представлены 15611 записями для породы йоркшир и 2457 – для породы ландрас. Анализ толщины шпика проводился по 17609 записям для породы йоркшир и 2984 записям для породы ландрас.

Статистическая обработка селекционных признаков в популяциях свиней включала описательную статистику и проверку на соответствие нормальному распределению с последующей фильтрацией данных. Логический контроль родословной на наличие аномалий проводился с помощью пакета *kinship2* языка программирования R.

Оценка вклада паратипических и генетических факторов в общее фенотипическое разнообразие изучаемых признаков осуществлялась с использованием уравнений смешанной модели BLUP. В модели учитывались классификационные и регрессионные факторы.

Определение величин селекционно-генетических параметров выполнялось на основе метода ограниченного максимального правдоподобия (AIREML).

Для конструирования моделей оценки племенных качеств свиней применяли математический аппарат построения и анализа уравнений смешанного типа, предложенный Ч.Хендерсоном (1973).

Для оптимизации структуры уравнений прогноза племенной ценности свиней по признакам продуктивности была использована смешанная модель вида:

– по воспроизводительным качествам:

$$y_{ijklmnpq} = \mu + FYMb_i + FYMw_j + N_k + F_l + M_m + \beta_1 A_n + Animal_q + e_{ijklmnpq},$$

– по мясным и откормочным показателям:

$$y_{ijklmn} = \mu + FYMb_i + S_j + F_k + M_l + \beta_2 W_n + \beta_3 U_q + Animal_r + e_{ijklmnpqr},$$

где y – результирующий признак (многоплодие, крупноплодность, скорость роста, толщина шпика); μ - популяционное среднее; $FYMb$ – ферма-год-месяц рождения; $FYMw$ – ферма-год-месяц опороса; N – номер опороса; S – пол животного; F – количество сибсов при

рождении; M – номер опороса матери, в который родилось животное; A – возраст первого опороса, дней; W – живая масса при рождении, г; U – масса при бонитировке, кг; $Animal$ – случайный эффект животного; β_n – коэффициент регрессии; e – остаточный эффект модели.

Геномный прогноз племенной ценности осуществлялся с помощью метода ssGBLUP (одношаговый метод геномного наилучшего линейного несмещенного прогноза (Misztal с соавт., 2009; Legarra с соавт., 2009)). Общее число генотипированных животных составило 5689 свиноматок и 183 хряка породы йоркшир, 1539 свиноматок и 194 хряка породы ландрас.

Комплексная оценка племенной ценности свиней осуществлялась путем разработки уравнений для построения селекционного индекса на основе рассчитанных селекционно-генетических параметров и экономических весов признаков. Вектор экономических коэффициентов по многоплодию, крупноплодности и толщине шпика составил 1620, 17, 195 рублей, соответственно; экономическая значимость для скорости роста определилась на уровне 32 руб. для породы йоркшир и 28 руб. – для породы ландрас.

Полученные результаты обрабатывались при использовании языков программирования R и Python, расчет компонентов дисперсии и прогноз племенной ценности производился с помощью программного пакета BLUPF90.

Все исследования в рамках диссертационной работы выполняли согласно схеме, приведенной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общая схема исследований

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Характеристика сформированной базы данных

Показатели многоплодия, крупноплодности, скорости роста и толщины шпика были выбраны для прогноза совокупной племенной ценности свиней, как имеющие большое экономическое значение для производства продукции свиноводства.

Характеристика фенотипических записей и популяционные параметры по признакам в исследуемых породах представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика массива данных о продуктивности свиноматок в разрезе пород (за весь период исследования)

Признаки	Порода	Количество животных	Число записей	Среднее значение ± ошибка	Стандартное отклонение
Многоплодие, гол	йоркшир	12991	31051	17,42 ± 0,053	4,77
	ландрас	2564	6073	16,42 ± 0,115	4,59
Крупноплодность, г	йоркшир	4908	7037	1242,31 ± 4,876	208,76
	ландрас	925	1303	1250,98 ± 11,160	205,55
Скорость роста, г	йоркшир	15611	15611	602,88 ± 1,120	71,39
	ландрас	2457	2457	680,50 ± 3,205	81,08
Толщина шпика, мм	йоркшир	17609	17609	7,48 ± 0,020	1,40
	ландрас	2984	2984	7,31 ± 0,057	1,59

Из всего генотипированного поголовья свиней после анализа качества геномных данных (метрики CallRate и GS Score, характеризующие качество генотипирования) были отобраны 4593 свиноматки и 113 хряков породы йоркшир и 1262 свиноматки и 98 хряков породы ландрас.

3.2 Формирование модели прогноза племенной ценности

Генетическая ценность животного определяется с помощью построения уравнений смешанной модели, позволяющих представить фенотипическое проявление признака(ов) как совокупность паратипических и генетических факторов, что позволяет оценить генотип животного независимо от внешних (средовых) условий. Для построения уравнения необходимо определить факторы, имеющие статистически значимое влияние на разнообразие селекционируемых признаков.

В нашем исследовании для каждой группы признаков (воспроизводительные, мясные и откормочные качества) набор *фиксированных* («ферма-год-месяц рождения», «ферма-год-месяц опороса», номер опороса, пол, количество сибсов при рождении, номер опороса матери, в который родилось животное) и *регрессионных* (возраст первого опороса, живая масса при рождении, живая масса при бонитировке) факторов был различным.

Поскольку фактор «номер опороса» в моделях может быть представлен как классификационный (имеет ограниченное количество градаций (n=8) с достаточным количеством животных внутри каждой градации), так и регрессионный (с непрерывным значением), а высоко коррелированный с ним фактор «возраст опороса» - только как регрессионный, для анализа их влияния на разнообразие признаков многоплодия и крупноплодности были построены линейные и полиномиальные (квадратичные) регрессионные модели с целью выбора оптимального фактора (рисунок 2-5).

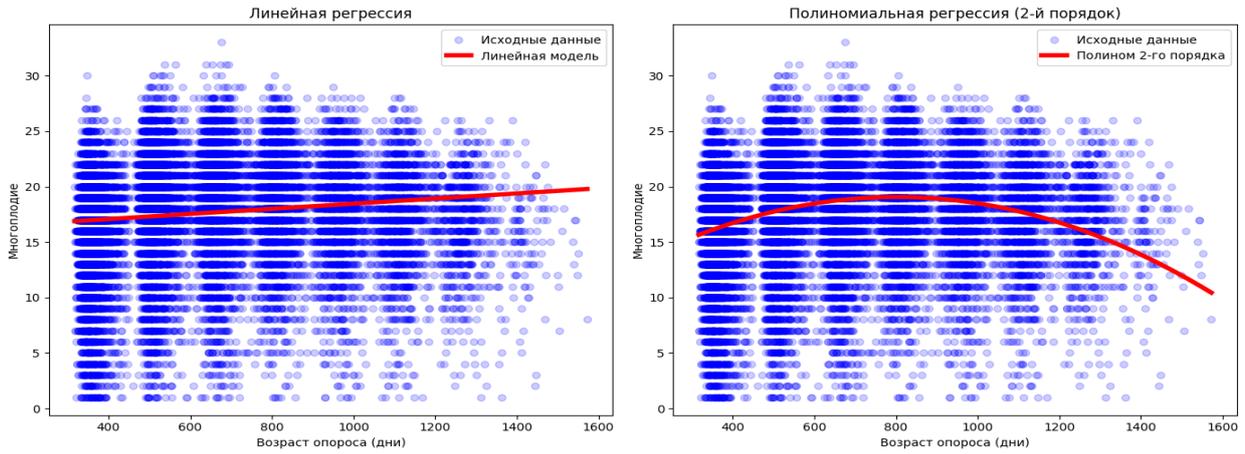


Рисунок 2 – График линейной и полиномиальной модели влияния фактора возраста опороса на изменчивость признака многоплодия в породе йоркшир

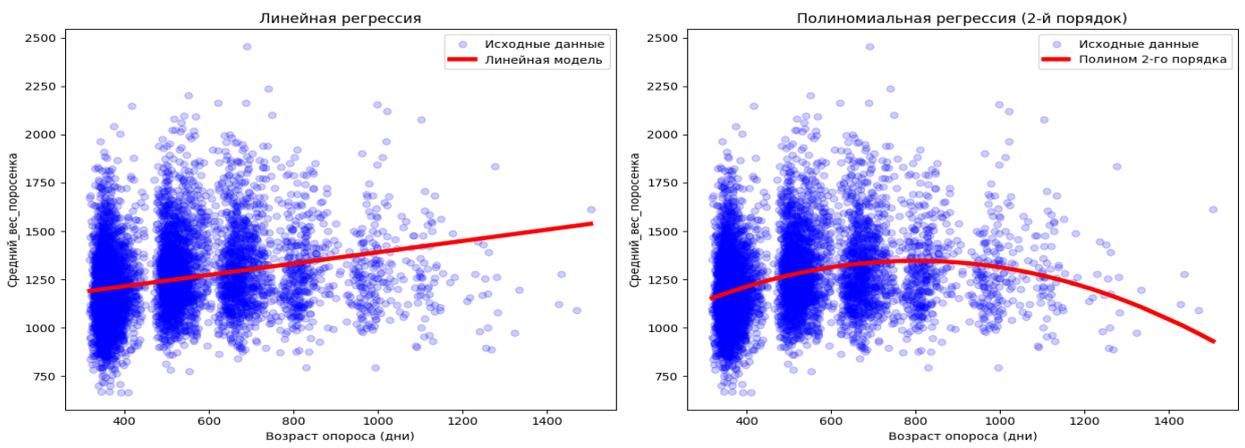


Рисунок 3 – График линейной и полиномиальной модели влияния фактора возраста опороса на изменчивость признака крупноплодности в породе йоркшир

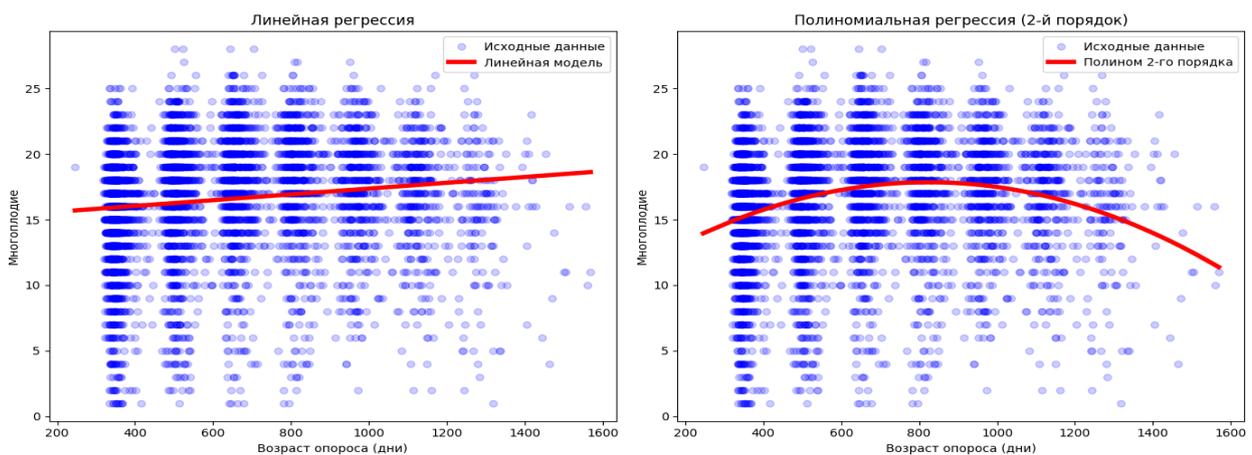


Рисунок 4 – График линейной и полиномиальной модели влияния фактора возраста опороса на изменчивость признака многоплодия в породе ландрас

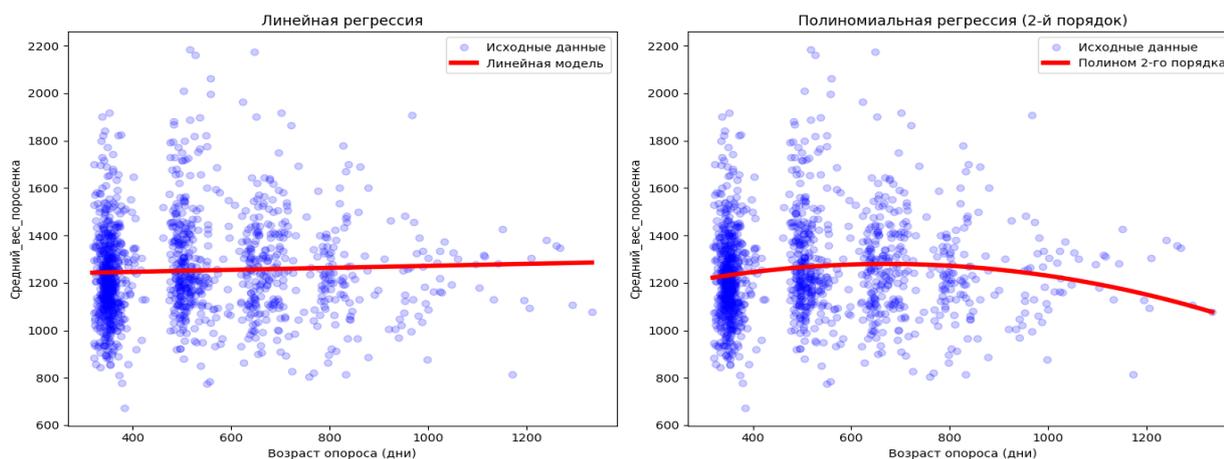


Рисунок 5 – График линейной и полиномиальной модели влияния фактора возраста опороса на показатель крупноплодности в породе ландрас

Выявлено, что факторы «номер опороса» и «возраст опороса» имеют нелинейное влияние на показатели многоплодия и крупноплодности. На вышеприведённых графиках можно наблюдать как линия квадратичной регрессии возрастает от 1-го к 3-му и/или 4-му опоросу, затем убывает к последнему опоросу, в то время как линейная модель описывает увеличение многоплодия и крупноплодности при увеличении номера и возраста опороса. Таким образом, фактор «номер опороса» включен в модель прогноза как классификационный.

По результатам проведенного дисперсионного анализа (ANOVA) были определены факторы, достоверно влияющие на изменчивость исследуемых признаков продуктивности свиней (таблица 2).

Таблица 2 – Оценка влияния факторов на изменчивость селекционных признаков свиней

Фактор	Признаки			
	многоплодие, гол	крупноплодность, кг	скорость роста, г/сут	толщина шпика, мм
Ферма-год-месяц рождения	а, б	а, б	а, б	а, б
Ферма-год-месяц опороса	а, б	а, б	*	*
Номер опороса	а, б	а, б	*	*
Пол животного	*	*	б	а, б
Количество сибсов в помете	—	—	а, б	а
Номер опороса матери, в который родилось животное	—	а	*	а, б
Возраст первого опороса,	а, б	а, б	*	*
Живая масса при рождении	*	*	а, б	*
Живая масса при бонитировке	*	*	*	а, б

В таблице символом «а» обозначено достоверное ($P > 0,95$ и выше) влияние фактора на изменчивость отдельного признака у свиней породы йоркшир, символом «б» - породы ландрас, символом «*» – фактор не оценивался.

Полученные результаты послужили основанием для оптимизации уравнений модели прогноза племенных качеств свиней по изучаемым признакам.

3.3 Оценка селекционно-генетических параметров в популяции свиней породы йоркшир и ландрас

В рамках проведенного исследования были оценены основные селекционно-генетические параметры исследуемой популяции свиней породы йоркшир и ландрас (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициенты наследуемости и вариансные компоненты в исследуемых популяциях свиней

Признаки	Параметр					
	коэффициент наследуемости (h^2)		генетическая варианса (σ_G^2)		остаточная варианса (σ_R^2)	
	йоркшир	ландрас	йоркшир	ландрас	йоркшир	ландрас
Многоплодие	0,14	0,13	2,93	2,49	18,15	17,36
Крупноплодность	0,20	0,18	7132,80	6078,10	28526	27302
Скорость роста	0,40	0,43	1956,30	2471,20	2974,6	3233,0
Толщина шпика	0,64	0,57	1,450	1,202	0,81117	0,925

Величины коэффициентов наследуемости по воспроизводственным показателям имели низкие значения (0,13 – 0,20), что указывает на высокую паратипическую составляющую в общей фонетической изменчивости признаков в двух популяциях свиней. Откормочные и мясные качества характеризовались более высоким уровнем наследуемости: 0,40-0,43 (по скорости роста) и 0,57-0,64 (по толщине шпика), что способствует получению большего эффекта селекции за счет правильно организованных селекционно-племенных мероприятий.

Представленные на рисунке 6 коэффициенты фенотипических и генетических корреляций указывают, что в различных парах признаков установились низкие или умеренные связи с отрицательными и положительными величинами. Так, признак «многоплодие» имеет отрицательные генетические связи (от -0,11 до -0,54) со всеми другими показателями в обеих породах. Положительные связи (как фенотипические, так и генетические) были установлены между признаками «крупноплодность» и «скорость роста», «скорость роста» и «толщина шпика» (от +0,22 до +0,62).

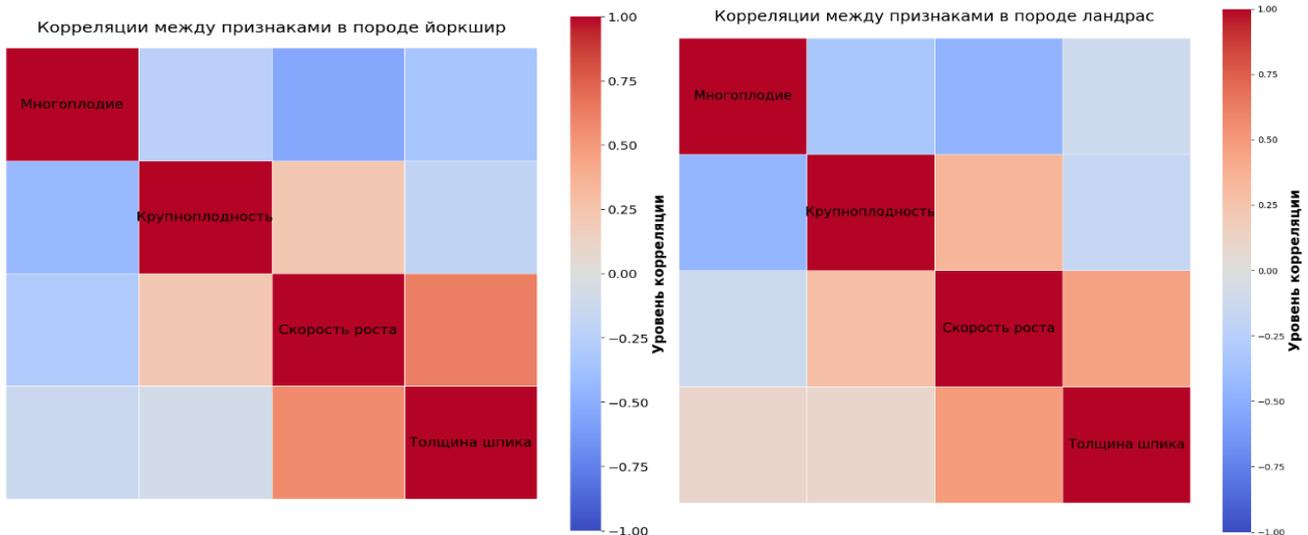


Рисунок 6 – Фенотипические и генетические корреляции признаков у свиней (Примечание – генетические корреляции – выше диагонали, фенотипические – ниже диагонали)

Все вышесказанное свидетельствует о том, что лучшие животные по одним селекционным признакам, необязательно будут таковыми и по другим. Селекция, направленная на улучшение определенного производственного признака, может привести к ухудшению другого признака, имеющим отрицательную корреляцию с ним. Соответственно, в данной ситуации особое значение приобретает разработка комплексной оценки свиней по экономически важным признакам на основе стратегии отбора по селекционному индексу.

3.4 Прогноз племенной ценности методами BLUP AM и ssGBLUP

На основании построенных оптимизированных уравнений смешанного типа осуществлен прогноз племенной ценности животных методом BLUP Animal Model и геномный прогноз племенной ценности методом ssGBLUP. Принципиальным отличием метода ssGBLUP является интеграция данных полногеномного генотипирования в модель, приводящая к повышению достоверности прогноза, в первую очередь, для генотипированных животных. Для негенотипированных животных различия в точности прогнозов между методами менее выражены. Поэтому наиболее актуальным является сравнение достоверности прогнозов, осуществленных разными методами, для генотипированных животных.

Результаты сопоставления достоверности прогнозов племенной ценности, полученных различными методами для группы генотипированных животных, отражены в таблице 4. Достоверность прогнозов отдельно для хряков и свиноматок представлена в диссертации.

Таблица 4 – Достоверность генетических и геномных прогнозов племенной ценности свиней

Порода	Метод оценки	Признаки			
		Многоплодие	Крупноплодность	Скорость роста	Толщина шпика
Йоркшир (n=4706)	BLUP AM	0,43	0,26	0,38	0,49
	ssGBLUP	0,64	0,45	0,59	0,71
Ландрас (n=1360)	BLUP AM	0,35	0,11	0,27	0,36
	ssGBLUP	0,45	0,15	0,37	0,47

В результате сравнительного анализа были выявлены статистически значимые ($p < 0,001$) различия средних значений достоверности прогноза в группе генотипированных животных. Максимальное увеличение достоверности при интеграции данных SNP маркеров в модель прогноза BLUP Animal Model наблюдалось по признаку толщины шпика в породе йоркшир (с 0,49 до 0,71), минимальное увеличение для крупноплодности в породе ландрас (с 0,11 до 0,15).

Для анализа распределения достоверности прогноза племенной ценности свиней, рассчитанного разными методами, были построены графики вида бокс-плот, представленные на рисунках 6-9.

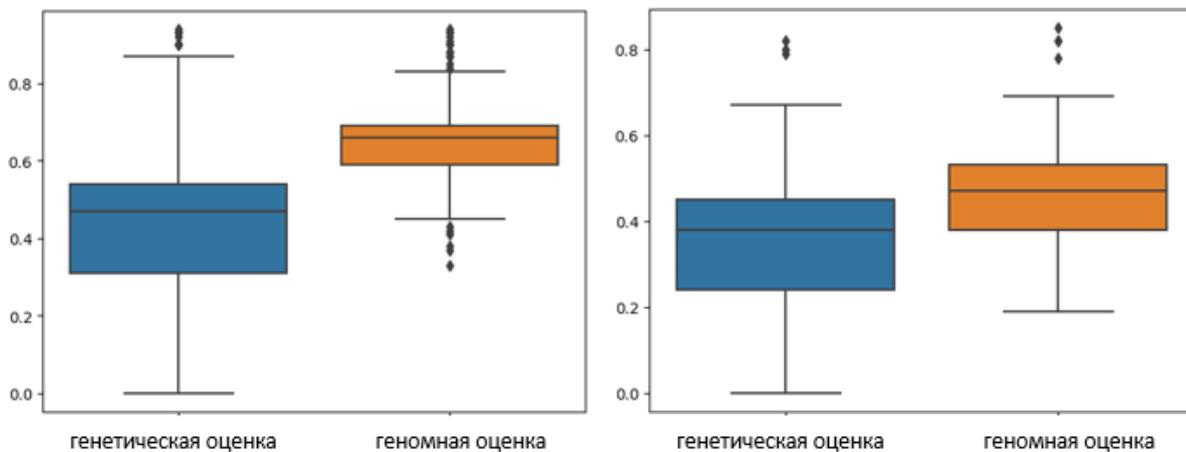


Рисунок 6 – Сравнение достоверности прогнозов племенной ценности по признаку многоплодия (здесь и далее: слева – порода йоркшир, справа – порода ландрас)

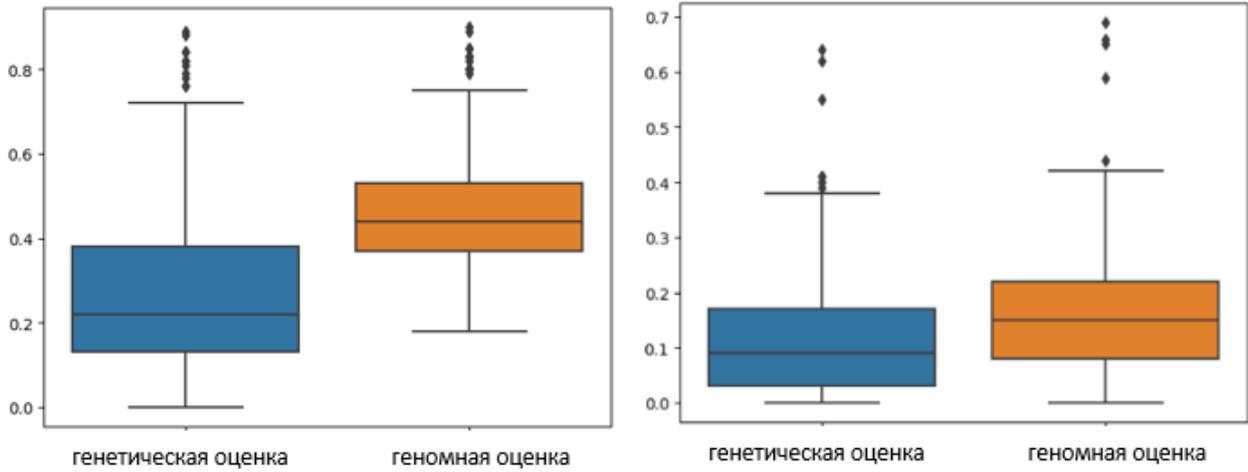


Рисунок 7 – Сравнение достоверности прогнозов племенной ценности по признаку крупноплодности

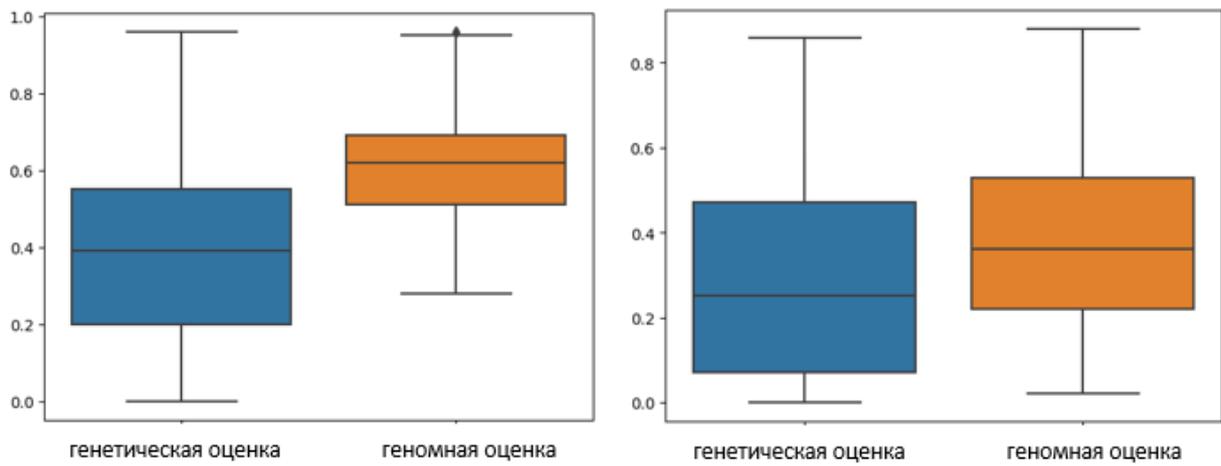


Рисунок 8 – Сравнение достоверности прогнозов племенной ценности по признаку скорости роста

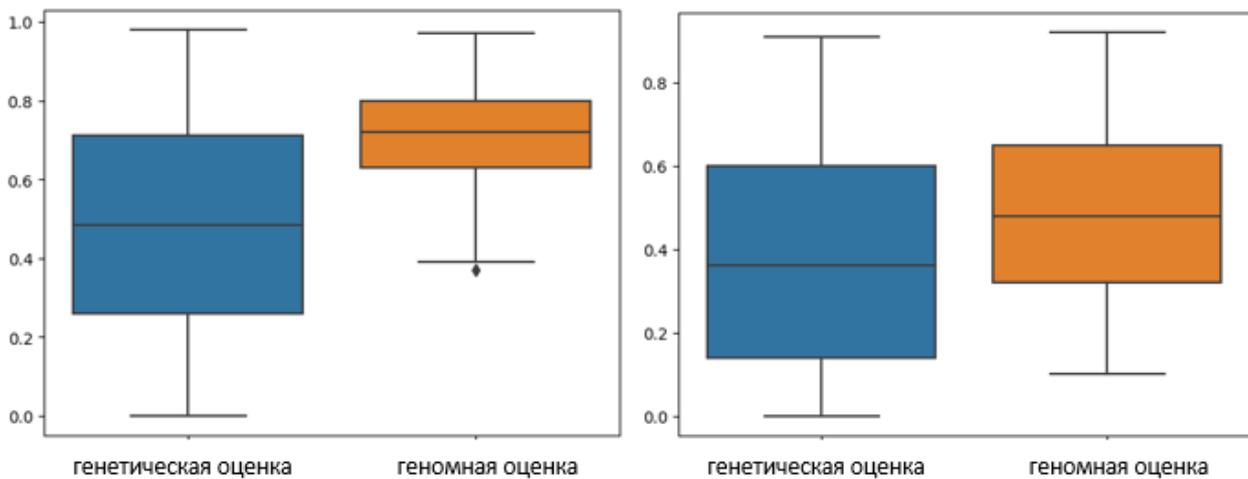


Рисунок 9 – Сравнение достоверности прогнозов племенной ценности по признаку толщины шпика

Представленные графики демонстрируют наименьший межквартильный размах (расстояние между 1 и 3 квартилем – на графике нижняя и верхняя граница «ящика») значений достоверности геномного прогноза при использовании метода ssGBLUP по большинству признаков, что свидетельствует о более высокой стабильности и согласованности результатов по сравнению с BLUP AM.

Для йоркширской породы минимальные значения достоверности геномного прогноза существенно отличаются от таковых в BLUP AM, тогда как у породы ландрас минимальные значения достоверности отличаются от нуля только по признакам многоплодия и толщины шпика. По остальным показателям минимальные значения достоверности в обоих методах близки к нулю. При этом различия в максимальных значениях достоверности между ssGBLUP и BLUP AM выражены слабо, что указывает на сопоставимую эффективность методов для животных с высоким уровнем достоверности.

Величины коэффициентов корреляции между достоверностью прогнозов на основе разных методов определились на уровне +0,90 – +0,97. Это указывает на то, что особи с высокой достоверностью оценки племенной ценности по BLUP AM демонстрируют и высокую достоверность по ssGBLUP.

Выявленные значения корреляции ($r = +0,72 - +0,85$) между прогнозными значениями племенной ценности, свидетельствуют о том, что селекционные группы животных, формируемые на основе разных методов, могут различаться по составу генотипов в пределах 15-28%.

3.5 Комплексная оценка племенной ценности свиней породы йоркшир и ландрас

Комплексная оценка племенной ценности по ряду признаков продуктивности осуществлялась на основании методологии построения уравнения селекционного индекса. Селекционный индекс позволяет объединить значения прогнозов племенной ценности животного по различным признакам продуктивности в единое значение индекса с учетом селекционной и экономической значимости каждого показателя. На основании рассчитанных селекционно-генетических параметров и экономических коэффициентов, а также с учетом цели разведения свиней и этапов селекционного процесса были построены три варианта уравнений селекционного индекса:

- 1) общий индекс (Index 1) для отбора животных в селекционные группы по четырем признакам продуктивности:

$$I_{1(\text{йоркшир})} = 225X_1 + 4X_2 + 6X_3 - 91X_4,$$

$$I_{1(\text{ландрас})} = 199X_1 + 3,8X_2 + 6X_3 - 65X_4,$$

- 2) оптимизированный индекс (Index 2) для целевого увеличения крупноплодности и скорости роста:

$$I_{2(\text{йоркшир})} = 2,8X_2 + 13,6X_3,$$

$$I_{2(\text{ландрас})} = 2,5X_2 + 14,4X_3,$$

3) оптимизированный индекс (Index 3) для целевого увеличения многоплодия и крупноплодности:

$$I_{3(\text{йоркшир})} = 281,5X_1 + 4,7X_2,$$

$$I_{3(\text{ландрас})} = 240X_1 + 3,8X_2,$$

где X_1 - X_4 – индексы племенной ценности свиней по многоплодию, крупноплодности, скорости роста и толщине шпика.

Далее, на основании разработанных вариантов селекционных индексов, была рассчитана племенная ценность свиней двух пород и определена связь между значениями селекционных индексов разной структуры и отдельных признаков продуктивности (таблица 5).

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции между селекционными индексами и величинами отдельных признаков продуктивности свиней

Признаки	Index 1		Index 2		Index 3	
	йоркшир	ландрас	йоркшир	ландрас	йоркшир	ландрас
Многоплодие	+0,47	+0,35	-0,04	-0,25	+0,64	+0,66
Крупноплодность	+0,70	+0,24	+0,57	+0,42	+0,70	+0,45
Скорость роста	+0,56	+0,73	+0,93	+0,97	+0,18	+0,02
Толщина шпика	-0,07	-0,33	+0,21	-0,04	+0,12	-0,14

Анализ показывает, что величины коэффициентов корреляции между оценками племенной ценности свиней по общему селекционному индексу (Index 1) и отдельными признаками продуктивности в разрезе пород варьируют в широком диапазоне: от -0,07 (толщина шпика, йоркшир) до +0,70 (крупноплодность, йоркшир). Такие результаты можно объяснить разным уровнем генетической корреляции между признаками, характерными для каждой модели. Оптимизированный Index 2 высоко сопряжен со скоростью роста (+0,93 и +0,97 для пород йоркшир и ландрас, соответственно) и имеет среднюю связь с крупноплодностью (+0,57 (йоркшир) и +0,42 (ландрас)), что согласуется с его предназначением. Аналогичная ситуация наблюдается в отношении оптимизированного Index 3, который максимизирует увеличение целевых показателей многоплодия и крупноплодности.

3.6 Сравнительный анализ эффективности отбора животных в селекционные группы

Моделирование отбора при формировании селекционных групп среди маточного поголовья осуществлялось на основании отбора 10% лучших особей по общему уравнению селекционного индекса и при использовании двухэтапной схемы отбора, при которой на первом этапе отбирались 20% лучших свиноматок по общему селекционному индексу, а затем из них отбирались 50% лучших по оптимизированному, включающему ограниченное число признаков продуктивности.

Анализ эффективности отбора производился путем сравнения средних значений племенной ценности животных в отобранной группе (таблица 6).

Таблица 6 – Средние значения племенной ценности свиноматок в селекционной группе в зависимости от схемы отбора животных

Схема отбора	Признаки			
	Многоплодие	Крупноплодность	Скорость роста	Толщина шпика
Йоркшир (n=420)				
10% Index 1	+0,60	+62,54	+16,72	-0,24
20% Index 1 50% Index 2	+0,31	+67,73	+25,81	-0,04
20% Index 1 50% Index 3	+0,80	+63,24	+5,46	-0,02
Ландрас (n=110)				
10% Index 1	+0,57	+16,33	+21,55	-0,40
20% Index 1 50% Index 2	+0,07	+29,26	+30,05	-0,13
20% Index 1 50% Index 3	+0,89	+17,83	+6,40	-0,30

По результатам анализа средних значений племенной ценности свиноматок пород йоркшир и ландрас установлено, что отбор животных по общему селекционному индексу приводит к сбалансированному увеличению всех показателей продуктивности, в то время как отбор по оптимизированным индексам с использованием двухэтапной схемы максимизирует увеличение целевых показателей продуктивности, не допуская снижения других признаков.

В исследованиях оценки эффективности отбора животных в селекционные группы хряков-производителей было проведено сопоставление результатов селекции хряков, отобранных на основе двух методов: методологии BLUP AM и ssGBLUP. Для сравнительного анализа были отобраны пятнадцать лучших животных, получивших наивысшие значения по селекционному индексу, построенному на основе геномных и генетических оценок четырех признаков продуктивности (таблице 7).

Таблица 7 – Сравнительный анализ эффективности отбора хряков в селекционные группы на основе различных методов

Селекционная группа хряков (n = 15)	Среднее значение селекционного индекса на основе оценок по:		Среднее значение геномной племенной ценности по:			
	BLUP	ssGBLUP	много-плодию	крупно-плодности	скорости роста	толщине шпика
Йоркшир						
Хряки (GEBV)	+368	+663	+0,46	+86,9	+27,2	-0,34
Хряки (EBV)	+447	+570	+0,40	+68,8	+25,3	-0,43
Ландрас						
Хряки (GEBV)	+522	+537	+0,24	+37,0	+57,2	-0,05
Хряки (EBV)	+573	+505	+0,31	+28,6	+54,0	-0,04

Полученные результаты свидетельствуют о том, что генетические характеристики пятнадцати лучших хряков, предполагаемых к отбору в селекционные группы (отцы хряков, отцы свиноматок) по разным принципам формирования групп, имеют расхождения. Средние значения племенной ценности выше в группах, сформированных на основании геномных прогнозов. Среднее значение селекционного индекса, основанного на геномных прогнозах выше в группах геномных хряков, отобранных на основании прогнозов методом ssGBLUP (на 21,6-44,5% в породе йоркшир и на 2,8% в породе ландрас). Прирост племенной ценности по отдельным признакам продуктивности за счет использования геномных прогнозов для хряков породы йоркшир составил +0,06 гол по многоплодию, +18,1 г по крупноплодности, +1,9 г по скорости и +0,09 мм по толщине шпика; для хряков породы ландрас по аналогичным признакам составил минус 0,07 гол, +8,4 г, +3,2 г и минус 0,01 мм, соответственно.

Приведенные фактические результаты свидетельствуют, что использование в племенной работе индексной селекции, основанной на геномных оценках, позволяет сформировать селекционные группы хряков, отличающихся наивысшими генетическими качествами по всему комплексу селекционных признаков, что при правильном формировании групп и оптимальном использовании включённых в них генотипов приводит к существенному повышению генетического прогресса всей популяции особей и увеличению эффективности производства продукции свиноводства на научно-обоснованной основе.

4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами исследования получены следующие результаты:

1. Сформирована исходная база данных животных породы йоркшир и ландрас, включающая фенотипические показатели, данные родословной и полногеномного генотипирования.

2. Определена достоверная степень влияния ряда факторов («ферма-год-месяц рождения», «ферма-год-месяц опороса», «номер опороса» и «возраст первого опороса») на разнообразие признаков многоплодие и крупноплодность в оцененных популяциях свиней. При оценке изменчивости признаков «скорость роста» и «толщина шпика» в обеих породах установлено значимое влияние факторов: «ферма-год-месяц рождения», «количество сибсов в помете», «живая масса при рождении».

3. При расчете коэффициентов наследуемости признаков в исследуемых породах свиней выявлены низкие и средние их значения (многоплодие (0,13-0,14), крупноплодность (0,18-0,20), скорость роста (0,40-0,43)), что указывает на достаточно высокую паратипическую составляющую в общей фенотипической изменчивости признаков в популяциях. По толщине шпика был определен высокий уровень наследуемости (0,64 и 0,57 для породы йоркшир и ландрас, соответственно).

4. Установлено, что генетические корреляции в различных парах признаков имеют низкие или умеренные связи с отрицательными и положительными величинами. Признак «многоплодие» характеризовался отрицательными генетическими связями со всеми исследуемыми признаками (от -0,11 до -0,54) в обеих породах. Положительные генетические связи были установлены между признаками «крупноплодность» и «скорость роста», «скорость роста» и «толщина шпика» (+0,22 и +0,62, соответственно).

5. Применение процедуры геномного прогноза (ssGBLUP) среди генотипированных свиней имело преимущество перед использованием генетического прогноза (BLUP Animal Model): достоверность прогноза методом ssGBLUP в породе йоркшир в зависимости от селекционного признака была выше в 1,3-1,8 раз, в породе ландрас – в 1,1-1,3 раза.

6. На основе расчета генетических и фенотипических вариантов и коварианс, коэффициентов наследуемости, коэффициентов генетической и фенотипической корреляций, а также определения экономических коэффициентов селекционных признаков в условиях ООО «Башкирская мясная компания» для чистопородного разведения свиней породы йоркшир и ландрас были построены 4 варианта уравнений селекционного индекса с различной структурой производственных признаков:

$$I_{1(\text{йоркшир})} = 225X_1 + 4X_2 + 6X_3 - 91X_4,$$

$$I_{1(\text{ландрас})} = 199X_1 + 3,8X_2 + 6X_3 - 65X_4,$$

$$I_{2(\text{йоркшир})} = 2,8X_2 + 13,6X_3,$$

$$I_{2(\text{ландрас})} = 2,5X_2 + 14,4X_3,$$

$$I_{3(\text{йоркшир})} = 281,5X_1 + 4,7X_2,$$

$$I_{3(\text{ландрас})} = 240X_1 + 3,8X_2,$$

где X_1 - X_4 – индексы племенной ценности свиней по многоплодию, крупноплодности, скорости роста и толщине шпика.

7. При моделировании отбора хряков в селекционные группы на основе результатов их оценки по геномному и генетическому прогнозу наилучшие результаты были выявлены у хряков, отобранных по значениям селекционного индекса. Использование селекционного индекса, построенного на основе геномных оценок признаков продуктивности, имело преимущество в величинах средней племенной ценности по сравнению с индексом, основанном на расчете генетических оценок признаков, на 21,6-44,5% в породе йоркшир и на 2,8% в породе ландрас.

4.2 ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ

На основе проведенных исследований, полученных результатов и сформулированных выводов предлагаем ООО «Уфимский селекционно-генетический центр» по разведении свиней пород йоркшир и ландрас:

- применять методологию ssGBLUP для прогноза племенной ценности хряков и свиноматок для максимизации генетического прогресса по экономически важным признакам и организации системы геномной оценки потомков на ранних стадиях их индивидуального развития;
- оптимизировать систему формирования селекционных групп хряков и свиноматок на основе результатов их комплексной оценки с использованием предлагаемых селекционных индексов;
- с целью повышения генетического эффекта по отдельным признакам продуктивности использовать двухступенчатую систему отбора свиней с использованием оптимизированных селекционных индексов.

4.3 ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие исследования по теме диссертации могут быть направлены на:

1. изучение экономической эффективности использования данных полногеномного генотипирования для модели прогноза племенной ценности в условиях селекционно-гибридных центров по разведению свиней (расчет соотношения затрат на генотипирование животных и срока их окупаемости в результате увеличения точности прогноза племенной ценности по селекционным признакам);
2. разработку биоэкономической модели для расчета экономических коэффициентов селекционного индекса с учетом максимально возможного количества переменных, влияющих на затраты, связанные с производством, а также доходы от реализации продукции свиноводства;
3. включение в уравнение селекционного индекса иных экономически важных признаков (конверсия корма, продуктивное долголетие свиноматок и др.).

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Савинов, А.В.** Анализ селекционно-генетических параметров в популяции свиней породы йоркшир и ландрас / А.В. Савинов, М.С. Круткина, А.М. Колов, Н.С. Алтухова, М.В. Белова, А.И. Рудь, И.В. Рукин // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2025. – №2. – С. 151-166. – DOI 10.26897/0021-342X-2025-2-151-166.
2. **Савинов, А.В.** Разработка и оптимизация уравнения селекционного индекса для комплексной оценки свиней породы йоркшир / А.В. Савинов, Н.С. Алтухова, М.С. Круткина, Н.А. Ложкин, М.В. Белова, А.И. Рудь, И.В. Рукин // Аграрная наука. – 2025. – №6. – С. 73-80. – DOI 10.32634/0869-8155-2025-395-06-73-80.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

3. **Савинов, А.В.** Развитие методов прогноза племенной ценности животных в свиноводстве / А.В. Савинов, М.С. Круткина, Н.С. Алтухова, И.В. Рукин // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича : Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 199-202.

4. **Савинов, А.В.** Разработка системы геномного прогноза племенной ценности крупного рогатого скота голштинской породы с лабораторным контролем качества фенотипических данных / А.В. Савинов, М.С. Круткина, Н.С. Алтухова, И.В. Рукин // Материалы Международного научного симпозиума, посвященного 150-летию со дня рождения выдающегося ученого в области зоотехнии академика Е.Ф. Лискуна «Достижения зоотехнической науки в решении актуальных задач животноводства и аквакультуры» : сборник статей, Москва, 14–17 ноября 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – С. 333-337.

5. Алтухова, Н.С. Оптимизация структуры селекционного индекса племенных качеств быков-производителей симментальской породы / Н.С. Алтухова, **А.В. Савинов**, А.Г. Соловых, Е.Е. Мельникова // АгроЗооТехника. – 2023. – Т. 6, № 2. – DOI 10.15838/alt.2023.6.2.4.

6. Алтухова, Н.С. Сравнительная оценка племенной ценности быков-производителей симментальской породы на породном и региональных уровнях управления / Н.С. Алтухова, И.Н. Янчуков, **А.В. Савинов**, Ю.А. Иванов // Научно-практическое обеспечение интенсивного развития животноводства и кормопроизводства на современном этапе : Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня основания Казахского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства, Алматы, 14–15 июня 2023 года. Том 2. – Алматы: ТОО «Казахский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства», 2023. – С. 84-91.