

УДК: 636.2.082.12:575.113.2:636.234.1
DOI: 10.52419/issn2072-2419.2026.1.369

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ГОМОЗИГОТНОСТИ И ГЕНОМНОГО ИНБРИДИНГА ГОЛШТИНСКИХ И ЧЕРНО-ПЕСТРЫХ БЫКОВ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ДОЧЕРЕЙ

Недашковский И.С.^{1*} – канд. биол. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом национального каталога Национального центра генетических ресурсов с.-х. животных (ORCID 0000-0003-0487-4576); **Контэ А.Ф.**² – канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. отдела популяционной генетики и генетических основ разведения животных (ORCID 0000-0003-4877-0883); **Кольцов Д.Н.**³ – д-р биол. наук, директор (ORCID 0000-0002-3977-8552); **Волкова В.В.**⁴ – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории ДНК-технологий в животноводстве (ORCID 0000-0002-2080-0182); **Сермягин А.А.**⁵ – канд. с.-х. наук, директор (ORCID 0000-0002-1799-6014)

^{1,2,4}Федеральный исследовательский центр «ВИЖ им. Л.К. Эрнста»

³ФГБНУ Федеральный научный центр лубяных культур,
обособленное подразделение Смоленский НИИСХ

⁵Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных, филиал Федерального исследовательского центра животноводства — ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста

* nedashkovsky_is@mail.ru

Ключевые слова: молочный скот, молочная продуктивность, воспроизводство, дисперсионный анализ, геномный инбридинг, гомозиготность, F_{ROH} , Ca, Fx.

Keywords: dairy cattle, analysis of variance, milk productivity, reproduction, genomic inbreeding, homozygosity, F_{ROH} , Ca, Fx

Финансирование: Исследования выполнены в рамках госзадания №124020200029-4 (FGGN-2024-0013)

Поступила: 01.11.2025

Принята к публикации: 05.03.2026

Опубликована онлайн: 01.04.2026



РЕФЕРАТ

Проведено исследование, направленное на изучение влияния геномного инбридинга (F_{ROH}) и уровня гомозиготности (Ca) на показатели молочной продуктивности и воспроизводства. Для оценки влияния F_{ROH} использованы данные по SNP-маркерам 196 быков-производителей, далее F_{ROH} присваивался дочерям ($n=64027$). F_{ROH} рассчитывали, как отношение суммы всех длин паттернов гомозиготности (ROH) в миллионах пар нуклеотидов (м.п.н.) в геноме быка-производителя к общему размеру генома в м.п.н., для 29 аутосом крупного рогатого скота, перекрываемых SNPs, выраженному в процентах. Для расчета

влияния инбридинга (Fх) использовали 196 быков и 64027 дочерей, Са по STR-маркерам 228 быков и 80849 дочерей. Для оценки влияния собственного Fх коров использовался массив в 39276 голов. Fх рассчитывали по формуле Райта-Кисловского, уровень Са как отношение количества гомозиготных локусов к общему количеству анализируемых локусов. Оптимальным уровнем Fх для получения высоких показателей молочной продуктивности является диапазон 0-3.125%. Высокий уровень инбридинга (6.25-12.5%) негативно влияет на жирномолочность. Таким образом установлена достоверная взаимосвязь между уровнем инбридинга по STR-маркерам и продуктивными качествами дочерей. Оптимальным с точки зрения молочной продуктивности является минимальный уровень инбридинга. Все показатели демонстрируют статистическую значимость ($p=0,00$). Наблюдается системное влияние геномного инбридинга на все исследуемые признаки и наиболее чувствительным оказался показатель содержания белка. Воспроизводительные качества демонстрируют умеренную зависимость от фактора. В качестве практических предложений можно рекомендовать использовать умеренный классический инбридинг в пределах 0-3.125%; контролировать уровень геномного инбридинга в диапазоне 4.2-7.5% и учитывать уровень гомозиготности по F_{ROH} и STR-маркерам при подборе пар, а также проводить регулярный мониторинг показателей продуктивности и воспроизводства.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Рассмотрение вопроса влияния инбридинга на показатели молочной продуктивности и воспроизводства остается актуальным по ряду причин: сокращение основных линий в связи с массовой ориентацией на быка-лидера, увеличение среднего уровня инбридинга в популяциях скота молочного направления продуктивности, переориентированность на отечественный рынок генетической селекции, находящийся в стагнации по причине значительного влияния и повсеместного использования импортной генетической продукции которой отдавался приоритет до недавнего времени. Так, в наших прошлых работах отмечалось негативное влияние инбридинга особенно высоких степеней на показатели молочной продуктивности и воспроизводства как при классическом расчете по родословным данным, так и при использовании геномных данных по STR и SNP-маркерам. Умеренная степень родства, наоборот, консолидировала наследственность [1,2,3].

Также, ранее нами было изучено влияние инбридинга на признаки и недостатки экстерьера, было установлено, что с увеличением уровня гомозиготности снижались значения оценки типа телосложения и увеличивался процент животных с недостатками экстерьера [4,5,6,7,8].

В условиях КП племзавода

«Рыбковское» Смоленской области было доказано, что тип подбора животных сычевской породы вазузского типа имеет влияние на молочную продуктивность. За наивысшую лактацию у аутбредных коров молочные показатели: удой, выход молочного жира и белка, на 2% выше, чем у инбредных. Независимо от типа подбора животные, в среднем, использовались 5 лактаций, при этом производственно-хозяйственное использование аутбредного поголовья на 3% дольше. В результате их пожизненная молочная продуктивность, по исследованным показателям, на 6% выше, а реализация генетического потенциала на 1% превысила данный показатель инбредированного поголовья. В плане воспроизводительных свойств, небольшое преимущество от коров без применения инбридинга имеет поголовье с отдаленной степенью инбридинга по продолжительности сервис- и межотельного периодов на 17 и 18 дней, соответственно [9].

В СПК им. Мичурина Орловской области на черно-пестрой породе, установлено, что умеренный инбридинг способствовал увеличению процента белка в молоке до 3,33%, что превзошло данный показатель у аутбредных аналогов на 0,2% ($p<0,01$) [10].

Проведенные исследования по определению взаимосвязей между методом

разведения, репродуктивными качествами телок и последующей их молочной продуктивностью в условиях предприятий Омской области установили, что лучшими характеристиками репродуктивных качеств обладают телки с коэффициентом инбридинга до 6,25 % или полученные в умеренном инбридинге и осеменённые с 13 до 18-месячного возраста. С возрастанием гомозиготности организмов уровень молочной продуктивности снижается. Аутбредные первотёлки, осеменённые до 18-месячного возраста, превосходят инбредных сверстниц по удою на 350 кг или 5,96 % [11].

Исследованиями, проведенными в стаде племенного завода СПК колхоз «Колос» Вавожского района Удмуртской Республики на коровах черно-пестрой породы установлено, что животные, полученные с применением родственного подбора, имеют более высокий удои по сравнению с аутбредными полусестрами (на 230,4 кг). Наибольший удои получен при сложном инбридинге, по сравнению с животными, полученными при простом и комплексном подборе, соответственно на 228,4 кг (3,9 %) и 80,4 кг (1,4 %). Наихудший показатель сервис-периода в зависимости от степени родственного спаривания обнаружен у животных с умеренной степенью инбридинга – 133,2 дня, что хуже показателя по группе аутбредных животных на 24,7 дней (18,5 %) [12].

Исследования на тёлках голштинской породы в ООО «ПЗ «Пушкинское» Нижегородской области установили, что повышение степени инбридинга не имеет значительного влияния на живую массу и интенсивность роста ремонтных тёлочек. При рождении все тёлки имели практически одинаковую массу, в 6 месяцев небольшое превосходство имели тёлки в группе с отдалённой степенью инбридинга – 192,4 кг, в 12 месяцев наибольшую массу имели тёлки с близким инбридингом – 361,9 кг. Наибольшая скорость роста от рождения до 6 месяцев характерна для ремонтного молодняка, полученного путём родственного спаривания с использованием отдалённой и умеренной степе-

ней инбридинга (850-856 г/сут.). Наибольшая скорость роста от 6 месяцев до года характерна для группы с близкой степенью инбридинга – 940 г в сутки. Коэффициент изменчивости живой массы при рождении в группе с близким инбридингом составил 10,93%, а в группе аутбридинга самый высокий показатель – 17,36% [13].

Другими исследованиями установлено, что при сравнении инбредных и аутбредных животных в целом, не наблюдалось существенной разницы между этими двумя группами. Когда же распределили инбредных животных по группам в зависимости от степени инбридинга, то было установлено, что с усилением степени инбридинга у подопытного поголовья снижается живая масса по максимальной лактации, несколько увеличивается возраст первого осеменения, уменьшается средний возраст в лактациях. Животные с умеренным инбридингом имели максимальный надой за наивысшую лактацию, а с отдалённым – максимальную продолжительность хозяйственного использования [14].

Для изучения влияния инбридинга на воспроизводительные качества были произведены исследования на голштинской породе популяции Орловской области. Было установлено, что инбридинг оказывает негативное влияние на воспроизводительные качества животных, но ведет к увеличению процента телочек в отеле или двоен [15].

Исследования, проведенные на базе ООО «ПЗ «Пушкинское» Нижегородской области установили, что телки, осеменённые в более раннем возрасте входящие в группу с умеренным инбридингом (14,87 мес.), имели самую низкую массу при первом осеменении — 425,7 кг. Самым коротким сервис-периодом обладали коровы в группе с умеренным инбридингом (108,9 дн.), самым длинным — в группе с близким инбридингом (152,6 дн.). Изменчивость живой массы при первом осеменении и оплодотворении во всех группах находилась на низком уровне ($C_v = 5,22...8,25$ %). Продолжительность сер-

вис-периода после первой лактации во всех группах, кроме группы близкого инбридинга, имела вариацию около 45 %, в группе близкого инбридинга в 1,5 раза выше. Несмотря на свою малочисленность, самой вариабельной по всем показателям оказалась группа близкого инбридинга. Повышение возраста первого оплодотворения телок в группе близкого инбридинга приводило к увеличению продолжительности сервис-периода ($r = 0,335$), в остальных группах связь между этими показателями практически отсутствовала. Многие исследуемые показатели имели между собой слабую положительную или отрицательную связь. Среди полученного молодняка более половины приходилось на телок, в группах с разными степенями инбридинга этот показатель варьировал от 63,3 до 66,7 %, в группе с аутбредными животными — 69,4 %. Двойни зарегистрированы 2 раза и только в группе с умеренной степенью инбридинга. Мертворожденность во всех группах находилась на достаточно низком уровне — 5,7...6,7 %, в группе с близкой степенью инбридинга не выявлено случаев мертворожденных телят. Рождения телят с врожденными уродствами и патологиями от родственных спариваний не наблюдалось [16].

Исследования на коровах голштинской, украинской черно- и красно-пестрой молочных породах, полученных от неродственного и различных степеней родственного спаривания в условиях Украины установили, что инбредные животные характеризуются высшими показателями продуктивного долголетия по сравнению с аутбредными. Среди инбредных животных по большинству исследуемых показателей лучшими оказались коровы, полученные от близкого и умеренного инбридинга. При величине коэффициента инбридинга меньше 0,78 и более 12,5% наблюдалось существенное ухудшение как продолжительности продуктивного использования коров, так и их пожизненных удоев. Инбредная депрессия была обнаружена только у животных голштинской породы, которые были по-

лучены с помощью тесного инбридинга. На это указывает существенное снижение большинства показателей их продуктивного долголетия. У коров украинской черно- и красно-пестрой молочных пород, которые были получены путем тесного инбридинга, показатели продолжительности и эффективности пожизненного использования, наоборот, увеличивались по сравнению с аутбредными [17].

В ходе оценки уровня влияния различных факторов на показатели молочной продуктивности и признаки экстерьера исследованиями в племенных заводах ЗАО «Глинки», ЗАО «Знамя», ООО «Луч», СПК «Племзавод «Разлив», племпредукторе ООО «Заураль» Курганской области на черно-пестром крупном рогатом скоте, установлено, что в результате дисперсионного анализа сила влияния породности на удой составила 8% ($P < 0,01$), типа телосложения — 32% ($P < 0,01$) [18].

Исследования проведенные дисперсионным анализом на коровах-первотелках черно-пестрой породы в ОАО «Совхоз Червишевский» Тюменского района Тюменской области, установили, что наиболее высокие и достоверные показатели силы влияния кратности доения на показатели молочной продуктивности получены на высший суточный удой — 0,219 кг (21,9 %) ($P \leq 0,05$) и удой за 100 дней лактации — 0,158 кг (15,8 %) ($P \leq 0,05$), несколько ниже на удой за 305 дней лактации — 0,076 кг (7,6 %) и удой за лактацию — 0,058 кг (5,8 %). В расчете силы влияния кратности доения на коэффициенты, характеризующие лактационную деятельность животных, получены следующие результаты: на коэффициент постоянства лактации — 0,19 (19%) ($P \leq 0,05$), на коэффициент полноценности лактации — 0,22 (22 %) ($P \leq 0,01$), на коэффициент равномерности удоя — 0,16 (16 %) ($P < 0,05$), на коэффициент молочности — 0,12 (12 %) [19].

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа, проведенного на черно-пестрой породе в СПК «Племзавод «Разлив» свидетельствуют о том, что тип

телосложения коров в большей степени влияет на удой, чем балльная оценка вымени, на 2,7 %; среднесуточный прирост живой массы в возрасте 12...18 мес. больше, чем возраст первого плодотворного осеменения, на 9,1 %. Сила влияния линейной принадлежности животных на величину удоя составляет 10,3 %, продуктивности матерей за наивысшую лактацию – 18,4 %. Анализ сочетания изучаемых факторов показывает, что эффективнее всего вести отбор коров на увеличение удоя, учитывая продуктивность матерей одновременно с линейной принадлежностью животных (5,8 %). При этом доля неучтенных факторов снижается до 65,5 % [20].

Резюмируя вышеизложенное, стоит отметить, что проблема инбридинга и его неоднозначное влияние на показатели молочной продуктивности и воспроизводства остается актуальной, а развитие современных технологий и эра геномной селекции в животноводстве дает возможность по-новому взглянуть на это направление. Генетическая информация, полученная по микросателлитным маркерам и средствам SNP-чипов высокой плотности выводит изучение данного вопроса на новый уровень.

Исходя из вышеизложенного целью исследования являлось изучение влияния геномного инбридинга и уровня гомозиготности на показатели молочной продуктивности и воспроизводства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Исследования проведены на дочерях (первотелках) генотипированных быков-производителей голштинской и чернопестрой пород. В рамках молекулярно-генетического исследования был проведён комплексный анализ уровня гомозиготности (Ca) у быков-производителей молочного направления продуктивности (черно-пёстрой и голштинской пород), представленных в племенных хозяйствах Московской области (n=228). Методология исследования включала несколько этапов. Выделение нуклеиновых кислот осуществлялось методом колоночной

хроматографии с применением специализированных наборов Nexttec (Nexttec Biotechnologie GmbH, Германия). Исходным материалом служила сперма племенных быков, обработка которой проводилась согласно протоколу производителя; генотипирование животных выполнялось с использованием мультиплексной панели микросателлитных маркеров (STR-локусов), включающей 12 генетических маркеров: TGLA227, BM2113, TGLA53, ETH10, SPS115, TGLA122, INRA23, TGLA126, BM1818, ETH3, ETH225, BM1824. Анализ генетических маркеров проводился на автоматизированном капиллярном секвенаторе ABI 3130xl Genetic Analyzer (Applied Biosystems, Life technologies, США). Определение длины аллельных вариантов осуществлялось с помощью программного обеспечения Gene Mapper v.4 (Applied Biosystems). Статистический анализ полученных данных выполнялся в программе GenAlEx 6.5.1, что позволило провести всестороннюю оценку генетической структуры исследуемой популяции [21]. Методика расчёта индивидуальной гомозиготности базировалась на определении соотношения количества гомозиготных локусов к общему числу анализируемых маркеров. При этом учитывались только локусы с полноформатными данными, исключая позиции с нулевыми аллелями (0/0). Классификация результатов проводилась путём распределения всего массива данных (n=80849 дочерей) на три основные группы по уровню гомозиготности: Группа 1 - полностью гетерозиготные особи (Ca=0%); Группа 2 - особи со средним уровнем гомозиготности (Ca=8-50%); Группа 3: особи с высоким уровнем гомозиготности (Ca=55-77%).

В рамках молекулярно-генетического исследования была сформирована репрезентативная выборка племенных быков (n=196), представляющих популяции крупного рогатого скота Московской области. Геномный анализ осуществлялся с применением современных методов высокопроизводительного генотипирования. Исходным материалом послужили образ-

цы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), выделенные из биологического материала исследуемых особей. Генотипирование животных проводилось с использованием специализированного биочипа Illumina Bovine SNP50K v2 Bead-Chip, обеспечивающего анализ 54 609 однонуклеотидных полиморфизмов (SNP). Данный подход позволил получить детальную информацию о генетической структуре исследуемой популяции на уровне однонуклеотидных замен. Анализ гомозиготных участков генома осуществлялся посредством выявления регионов протяжённой (паттернов) гомозиготности (Runs Of Homozygosity, ROH). Статистическая обработка полученных данных проводилась с применением программного обеспечения Plink версии 1.9, что позволило провести комплексный анализ паттернов гомозиготности в геномах исследуемых особей [22]. Методологическая основа исследования базировалась на применении специализированного программного обеспечения cgaTOH, предназначенного для комплексного анализа паттернов гомозиготности [23]. В рамках молекулярно-генетического исследования был разработан комплексный подход к выявлению и количественной оценке ROH в геномах племенных быков-производителей. Критерии идентификации ROH включали следующие параметры: наличие как минимум 15 последовательных гомозиготных однонуклеотидных полиморфизмов (SNP); минимальная плотность маркеров — 1 SNP на каждые 100 kb; максимально допустимый промежуток между маркерами — 1000 kb. Алгоритм количественной оценки геномного инбридинга, основанный на анализе протяжённых участков гомозиготности (ROH) включает следующие компоненты: определение суммарной протяжённости всех идентифицированных ROH-участков в геноме, измерение длины выявленных гомозиготных регионов в миллионах пар нуклеотидов, анализ 29 аутосомных хромосом крупного рогатого скота, покрытых SNP-маркерами. При этом он базируется на принципе расчёта процентного

соотношения, где числителем выступает суммарная длина всех обнаруженных ROH-участков, а знаменателем является общий размер исследуемого генома. Результат выражается в процентном соотношении. Особенности методологии учитывали ограничения различных типов генотипирования: панель средней плотности (50K) характеризуется переоценкой коротких ROH (1–4 млн пар нуклеотидов); панель высокой плотности (600K, Bovine HD) демонстрирует недооценку ROH протяжённостью более 8 млн пар нуклеотидов [24]. В связи с этим при работе с 50K панелью особое внимание уделялось выявлению ROH размером более 4 млн пар нуклеотидов для обеспечения корректности оценки [25]. Классификация популяционных данных проводилась на основе распределения массива потомков ($n=64027$) по величине коэффициента инбридинга, определённого по ROH (FROH), унаследованного от отцов: Группа 1 - FROH = 0,55–4,19%; Группа 2 - FROH = 4,2–7,59%; Группа 3 - FROH = 7,65–10,87%; Группа 4 - FROH = 10,89–17,71%.

В рамках математико-статистического анализа генетических параметров популяций был применён классический метод расчёта коэффициента инбридинга (F_x) на основе родословных данных. Теоретическая база наших исследования опирается на модифицированную формулу Райта-Кисловского, адаптированную для процентного выражения генетического родства [26]:

$$F_x = \sum \left[\left(\frac{1}{2} \right)^{n+n_1-1} \times (1 + f_a) \right] \times 100 \quad (1)$$

где F_x — количественная оценка степени инбридинга исследуемого индивидуума; f_a — коэффициент инбридинга общего предка, имеющего собственное инбредное происхождение; n — количество поколений от общего родоначальника по материнской линии; n_1 — количество поколений от общего родоначальника по отцовской линии.

Статистическая выборка включала 196 быков-производителей, для которых был проведён расчёт коэффициента ин-

бридинга. Полученные значения F_x были экстраполированы на массив их потомства ($n=64027$). Классификация данных осуществлялась путём стратификации популяции по уровню инбридинга: группа 1 - аутбредные особи ($F_x=0\%$); группа 2 - отдаленный инбридинг ($F_x=0,1-3,125\%$); группа 3 - умеренный инбридинг ($F_x=3,126-6,25\%$); группа 4 - близкий инбридинг ($F_x \geq 6,26\%$).

В качестве научного задела дисперсионным анализом изучено влияния F_x коров на молочную продуктивность и воспроизводство с числом наблюдений 39276 для признаков молочной продуктивности и фертильности и с числом наблюдений 38760 для показателя живой массы коров.

В рамках статистического анализа генетических данных нами был применён дисперсионный анализ как методологический инструмент для количественной оценки влияния инбридинга как фиксированного фактора на исследуемые фенотипические признаки. Статистическая обработка осуществлялась с использованием программного обеспечения Statistica версии 10.

Математическая модель однофакторного дисперсионного анализа описывается следующим уравнением:

$$x_{ik} = a + m_i + \varepsilon_{ik}, \quad (2)$$

где: a — генеральное среднее значение (математическое ожидание) всей выборки наблюдений $M(X)$; m_i — эффект воздействия i -го уровня фактора A на исследуемый признак X , представляющий собой отклонение математического ожидания a_i при i -м уровне фактора от общего среднего значения a , то есть $m_i = a_i - a$; ε_{ik} — случайная компонента, отражающая совокупное влияние неконтролируемых факторов на значение признака x_{ik} .

При принятии гипотезы о равенстве дисперсий между группами, предпочтительным методом оценки дисперсии является использование взвешенного среднего выборочных дисперсий. Этот подход позволяет уменьшить влияние выбросов и

сделать оценку более точной при условии равенства дисперсий [27].

Дисперсионный анализ представляет собой фундаментальный математический инструмент, базирующийся на методологии статистической проверки гипотез и предназначенный для исследования влияния различных факторов на исследуемые случайные величины [28].

Общая дисперсия признака определялась по формуле:

$$D_{\text{общ}} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (3)$$

где: x_i — значение признака у i -го животного; среднее значение признака по выборке; n — объем выборки.

Факторная дисперсия (влияние инбридинга):

$$D_F = \frac{\sum(x_j - \bar{x}_j)^2}{r-1}, \quad (4)$$

где: \bar{x}_j — среднее значение признака в j -й группе; r — количество групп.

Остаточная дисперсия (случайные факторы):

$$D_F = \frac{\sum(x_i - x_j)^2}{n-r}, \quad (5)$$

Оценка значимости различий:

F -критерий Фишера рассчитывается как отношение факторной и остаточной дисперсий:

$$F = \frac{MS_F}{MS_O}, \quad (6)$$

где: MS_F и MS_O — средние квадраты факторной и остаточной дисперсии соответственно.

Определение силы влияния фактора:

Коэффициент детерминации (R^2) показывает долю дисперсии, обусловленную влиянием фактора инбридинга:

$$R^2 = \frac{SS_F}{SS_{\text{общ}}}, \quad (7)$$

где SS_F — сумма квадратов отклонений для фактора; $SS_{\text{общ}}$ — общая сумма квадратов отклонений

РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Проведенный анализ данных позволя-

ет сделать следующие выводы о влиянии уровня инбридинга на продуктивные и воспроизводительные качества коров (Таблица 1).

Воспроизводительные качества демонстрируют неоднозначную картину. С увеличением уровня инбридинга наблюдается тенденция к снижению возраста первого отела (от 27.29 до 26.71 месяцев), что статистически значимо при максимальном уровне инбридинга (6.25-12.5%). При этом сервис-период увеличивается с ростом инбридинга, достигая максимума при уровне 3.125-6.25% (160.55 дней), что негативно характеризует воспроизводительные способности. При максимальном уровне инбридинга (6.25-12.5%) наблюдается наивысший удой — 6792.69 кг, что статистически значимо выше группы аутбредных животных. Однако при дальнейшем анализе увеличения уровня инбридинга показатели стабилизируются или даже снижаются. Содержание жира в молоке имеет обратную зависимость от уровня инбридинга, снижаясь с 4.08% до 4.02% при увеличении инбридинга. Качественные показатели молока демонстрируют относительную стабильность. Содержание белка остается на уровне 3.21-3.23%, с колебаниями в пределах статистической погрешности. Количество белка в молоке увеличивается с ростом инбридинга, достигая максимума при высоком уровне (6.25-12.5%). Живая масса коров показывает незначительную тенденцию к увеличению с ростом уровня инбридинга, варьируя от 506.96 до 510.57 кг.

Можно отметить следующее, оптимальным уровнем инбридинга для получения высоких показателей молочной продуктивности является диапазон 0-3.125%. Высокий уровень инбридинга (6.25-12.5%) негативно влияет на жирномолочность. Воспроизводительные качества ухудшаются с увеличением уровня инбридинга. В данном случае необходимо использовать умеренный инбридинг для повышения молочной продуктивности при контроле качества потомства, а также рекомендуется учитывать индиви-

дуальные особенности стада при планировании селекционной работы с учетом уровня инбридинга.

Проведенный дисперсионный анализ влияния классического инбридинга быков-производителей на показатели продуктивности и воспроизводства их дочерей демонстрирует статистически значимые результаты по всем исследуемым признакам ($p=0,00$). Множественные коэффициенты корреляции варьируют от 0,038 до 0,070, что указывает на умеренную связь между фактором инбридинга и исследуемыми признаками. Коэффициенты детерминации (R^2) показывают, что фактор инбридинга объясняет от 0,15% (возраст первого отела) до 0,49% (удой за 305 дней) вариации признаков. Молочная продуктивность демонстрирует наиболее сильное влияние фактора ($R^2=0,49\%$). Удой за 305 дней показывает высокие значения F-критерия (106,12), что подтверждает статистическую значимость влияния. Жирность молока имеет $R^2=0,27\%$, что указывает на умеренное влияние фактора на качественный показатель, белковость молока демонстрирует $R^2=0,24\%$, показывая схожее с жирностью влияние. Воспроизводительные качества (сервис-период, возраст первого отела) имеют более низкие показатели влияния ($R^2=0,22-0,15\%$).

С точки зрения математической интерпретации высокие значения F-критерия (от 32,29 до 106,12) свидетельствуют о статистической значимости различий между группами. Низкие значения остаточной дисперсии ($MS(O)$) подтверждают надежность полученных результатов.

В биологический аспект это указывает на системное влияние фактора инбридинга на все исследуемые признаки. Наиболее чувствительным к влиянию фактора оказался показатель удоя. Воспроизводительные качества демонстрируют меньшую зависимость от фактора инбридинга.

Таблица 1 – Взаимосвязь абсолютных показателей молочной продуктивности и воспроизводительных качеств дочерей быков в связи с уровнем инбридинга быков-отцов (F_x)

Уровень F _x	Возраст 1 отела, мес.	Сервис период - 1 л.	Дойные дни - 1 л.	Удой за 305, кг - 1 л.	Жир за 305, % - 1 л.	Жир за 305, кг - 1 л.	Белок за 305, % - 1 л.	Белок за 305, кг - 1 л.	Живая масса, кг - 1 л.
0% 46 быков (n=17243)	27.29± 0.029	149.41± 0.620	360.74± 0.589	6387.02± 10.639	4.08± 0.003	260.69± 0.477	3.23± 0.001	206.15± 0.360	506.96± 0.338
0-3.125% 117 быков (n=34407)	27.13± 0.020	157.20± 0.461	368.72± 0.433	6582.14± 7.557	4.07± 0.002	267.62± 0.333	3.21± 0.001	211.18± 0.248	510.57± 0.232
3.125- 6.25% 28 быков (n=10327)	27.42± 0.037	160.55± 0.830	371.96± 0.780	6461.13± 13.919	4.02± 0.004	259.78± 0.608	3.23± 0.002	208.67± 0.462	507.18± 0.416
6.25- 12.5% 5 быков (n=2050)	26.71± 0.082	156.84± 1.815	370.17± 1.822	6792.69± 30.255	4.03± 0.008	274.05± 1.347	3.20± 0.004	217.27± 1.016	510.01± 0.913
R	0.0245	1.35	1.40	13.99	-0.0096	-0.065	-0.0027	0.27	-0.19

Примечание: здесь и далее, **p*<0.05; ***p*<0.01; ****p*<0.001; н.д. — недостаточно; R - регрессия
/ * — достоверное различие между показателями II и III, II и IV групп;
/ ** — достоверное различие между показателями III и IV групп

Таблица 2 – Дисперсионный анализ влияния Fx быков-производителей на показатели молочной продуктивности и воспроизводства дочерей

Признак	Множественный R	Множественный R ²	Скорректированный R ²	SS (F)	N (F)	MS (F)	SS (O)	N (O)	MS (O)	F	p
Возраст 1 отела, мес.	0.03886 ₇	0.001511	0.001464	1324	3	441	8.750183E+05	64023	14	32.2874	0.00
Сервис период - 1 л.	0.04699 ₄	0.002208	0.002162	1003833	3	334611	4.535491E+08	64023	7084	47.2337	0.00
Дойные дни - 1 л.	0.05085 ₂	0.002586	0.002539	1049917	3	349972	4.049627E+08	64023	6325	55.3293	0.00
Удой за 305, кг - 1 л.	0.07034 ₁	0.004948	0.004901	62533805 ₉	3	20844602 ₀	1.257587E+11	64023	1964273	106.118 ₇	0.00
Жир за 305, % - 1 л.	0.05176 ₇	0.002680	0.002633	26	3	9	9.752277E+03	64023	0	57.3442	0.00

Жир за 305, кг - 1 л.	0.06362 2	0.004048	0.004001	1000971	3	333657	2.462863E+08	64023	3847	86.7353	0.00
Белок за 305, % - 1 л.	0.04938 5	0.002439	0.002392	6	3	2	2.318220E+03	64023	0	52.1746	0.00
Белок за 305, кг - 1 л.	0.05497 0	0.003022	0.002975	420611	3	140204	1.387737E+08	64023	2168	64.6827	0.00
Живая масса, кг - 1 л.	0.04004 7	0.001604	0.001557	192528	3	64176	1.198574E+08	64023	1872	34.2802	0.00

Примечание: Множественный R – множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту связи между зависимой переменной и предиктором, множественный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный на число факторов, $SS(F)$ – внутригрупповая изменчивость, $SS(O)$ – дисперсия ошибки, $MS (F)$ – межгрупповой разброс факториальной дисперсии (называемый средним квадратом эффекта), $MS (O)$ – межгрупповой разброс остаточной дисперсии (или дисперсии ошибки), степень свободы (F) – число степеней свободы для фактора (эффекта) ($N(F) = r - 1$; в нашем исследовании число фактора (эффектов) $r = 4$, следовательно $N(F) = 4 - 1 = 3$; степень свободы (O) – число степеней свободы для остаточной (случайной) дисперсии ($N(O) = N - r$; в нашем исследовании число наблюдений $N = 64027$, следовательно $n(o) = 64027 - 4 = 64023$; F -критерий оценивает статистическую значимость различия средних в группах, P – вероятность ошибочного результата.

Таблица 3 – Дисперсионный анализ влияния Fx коров на показатели молочной продуктивности и воспроизводства

Признак	Множественный R	Множественный R ²	Скорректированный R ²	SS (F)	N (F)	MS (F)	SS (O)	N (O)	MS (O)	F	p
Возраст 1 отела, мес.	0,018001	0,000324	0,000222	160	4	40	4,946910E+05	39271	13	3,18	0,012
Сервис период - 1 л.	0,006595	0,000043	-0,000058	11829	4	2957	2,719769E+08	39271	6926	0,42	0,789
Межотельный период - 2 л.	0,006764	0,000046	-0,000056	12587	4	3147	2,750877E+08	39271	7005	0,44	0,773
Удой за 305, кг - 1 л.	0,029892	0,000894	0,000792	68942174	4	1723544	7,708798E+10	39271	1962975	8,78	0,000
Жир за 305, % - 1 л.	0,022398	0,000502	0,000400	3	4	1	5,788557E+03	39271	0	4,92	0,001
Жир за 305, кг - 1 л.	0,032783	0,001075	0,000973	156780	4	39195	1,457253E+08	39271	3711	10,56	0,000

Белок за 305, % - 1 л.	0,038865	0,001511	0,001409	2	4	1	1,563255E+03	39271	0	14,85	0,000
Белок за 305, кг - 1 л.	0,035084	0,001231	0,001129	105562	4	26390	8,565487E+07	39271	2181	12,09	0,000
Дойные дни - 1 л.	0,005836	0,000034	-0,000068	8714	4	2179	2,558067E+08	39271	6514	0,33	0,854
Кратность осемен. в - 1 л.	0,009466	0,000090	-0,000012	6	4	1	6,454219E+04	39271	2	0,87	0,475
Количество абортос к - 1 л.	0,008667	0,000075	-0,000027	0	4	0	3,116851E+02	39271	0	0,73	0,566
Живая масса, кг - 1 л.	0,027430	0,000752	0,000649	49392,45	4	12348,11	65595718	38755	1692,5	7,29	0,000

Примечание: Множественный R – множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту связи между зависимой переменной и предиктором, множественный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный на число факторов, $SS(F)$ – внутригрупповая изменчивость, $SS(O)$ – дисперсия ошибки, $MS(F)$ – межгрупповой разброс факториальной дисперсии (называемый средним квадратом эффекта), $MS(O)$ – межгрупповой разброс остаточной дисперсии (или дисперсии ошибки), степень свободы (F) – число степеней свободы для фактора (эффекта) ($N(F) = r - 1$; в нашем исследовании число фактора (эффектов) $r = 5$, следовательно $N(F) = 5 - 1 = 4$; степень свободы (O) – число степеней свободы для остаточной (случайной) дисперсии ($N(O) = N - r$; в нашем исследовании число наблюдений $N = 39276$, следовательно $n(o) = 39276 - 5 = 39271$; $N = 38760$ для живой массы, следовательно $n(o) = 38760 - 5 = 38755$, $8F$ -критерий оценивает статистическую значимость различия средних в группах, P – вероятность ошибочного результата.

Все это позволяет нам сделать заключение, что как фактор «классический инбридинг» быков производителей оказывает статистически значимое влияние на продуктивные и воспроизводительные качества дочерей. При этом наибольшее влияние наблюдается на показатели молочной продуктивности, особенно на удой, а качественные показатели молока (жирность и белковость) демонстрируют умеренную зависимость от фактора инбридинга. В отличие от молочных признаков воспроизводительные качества менее чувствительны к влиянию данного фактора.

Установлено также разнонаправленное влияние фактора инбридинга на различные показатели продуктивности и воспроизводства самих коров (Таблица 3).

Множественные коэффициенты корреляции варьируются от 0,0058 до 0,0389. Коэффициенты детерминации показывают, что фактор инбридинга объясняет от 0,0034% (дойные дни) до 0,1511% (белок в молоке) вариации признаков. Молочная продуктивность демонстрирует наиболее выраженное влияние фактора: удой за 305 дней ($R^2=0,0894\%$, $F=8,78$, $p=0,000$); содержание белка ($R^2=0,1511\%$, $F=14,85$, $p=0,000$) и содержание жира ($R^2=0,0502\%$, $F=4,93$, $p=0,0005$). При этом качественные показатели молока более чувствительны к влиянию инбридинга, чем количественные.

Что касается воспроизводительных качеств, то сервис-период и межотельный период практически не зависят от фактора инбридинга (R^2 менее 0,005%), возраст первого отела показывает слабое влияние фактора ($R^2=0,0324\%$). Живая масса коров демонстрирует умеренную зависимость от инбридинга ($R^2=0,0752\%$, $F=7,30$, $p=0,000007$), а показатели кратности осеменения и абортос не имеют статистически значимой связи с фактором инбридинга.

Полученные результаты указывают на то, что значимые F-критерии получены для показателей молочной продуктивности, низкие значения p-уровня (менее 0,0001) подтверждают статистическую

значимость влияния фактора на продуктивные признаки, а высокие значения остаточной дисперсии для некоторых показателей указывают на влияние других факторов. Это говорит о том, что наблюдается избирательное влияние инбридинга на различные признаки. Наиболее чувствительными оказались показатели качества молока, воспроизводительные качества демонстрируют устойчивость к влиянию инбридинга.

Интересная зависимость между уровнем гомозиготности быков-отцов по STR-маркерам и показателями продуктивности их дочерей (Таблица 4).

Из таблицы видно, что молочная продуктивность имеет тенденцию к снижению с ростом уровня гомозиготности. В группе с максимальной уровнем гомозиготности (55-77%) удой ниже на 158,34 кг. Содержание жира показывает незначительное повышение в средней группе. Содержание белка имеет тенденцию к снижению при высоком уровне гомозиготности.

Сервис-период демонстрирует улучшение в группе с высоким уровнем гомозиготности (сокращение на 9,56 дней). Дойные дни также имеют тенденцию к снижению с ростом уровня гомозиготности, а возраст первого отела практически не зависит от намеченных трендов. Живая масса коров показывает незначительное увеличение в группах с повышенным уровнем гомозиготности.

Наиболее значимые различия наблюдаются по показателям удоя и продолжительности лактации.

В общей картине, наблюдается улучшение некоторых воспроизводительных качеств при повышенном инбридинге. При этом снижение молочной продуктивности при высоком уровне гомозиготности соответствует теоретическим ожиданиям, а незначительные изменения в показателе возраста первого отела указывают на стабильность этого признака.

Таким образом установлена достоверная взаимосвязь между уровнем гомозиготности по STR-маркерам и продуктивными качествами дочерей. Оптимальным

с точки зрения молочной продуктивности является минимальный уровень гомозиготности. Воспроизводительные же качества демонстрируют неоднозначную реакцию на повышение инбридинга.

Результаты дисперсионного анализа демонстрируют существенное влияние уровня гомозиготности на показатели молочной продуктивности и воспроизводства (Таблица 5).

Таблица 4 – Взаимосвязь абсолютных показателей молочной продуктивности и воспроизводительных качеств дочерей быков в связи с уровнем гомозиготности быков-отцов (Ca)

Уровень Ca	Возраст 1 отела, мес.	Сервис период - 1 л.	Дойные дни - 1 л.	Удой за 305, кг - 1 л.	Жир за 305, % - 1 л.	Жир за 305, кг - 1 л.	Белок за 305, % - 1 л.	Белок за 305, кг - 1 л.	Живая масса, кг - 1 л.
0% 9 быков (n=3280)	27.15 ± 0.067	155.0 9 ± 1.519	367.58 ± 1.433	6517.6 4 ± 24.742	4.00 ± 0.006	261.07 ± 1.081	3.21 ± 0.003	209.11 ± 0.823	504.9 4 ± 0.772
8,3 – 50% 212 быков (n=75331)	27.25 ± 0.013	155.4 5 ± 0.305	367.05 ± 0.291	6457.5 1 ± 5.108*	4.05 ± 0.001**	261.93 ± 0.225	3.21 ± 0.001	207.41 ± 0.170*	507.4 9 ± 0.161**
55-77% 7 быков (n=2238)	27.61 ± 0.086***	145.5 3 ± 1.757**	358.53 ± 1.670**	6359.3 0 ± 33.567**	4.00 ± 0.008 ^{н.д.} ***	255.46 ± 1.521**/***	3.19 ± 0.004**	203.32 ± 1.139**	508.8 0 ± 0.973**
R	0,311	-14,74	-13,96	-178,54	0,055	-3,0	-0,02	-6,8	-0,28

Множественные коэффициенты корреляции варьируются от 0,012 до 0,034. Коэффициенты детерминации (R^2) показывают, что фактор инбридинга объясняет от 0,015% (живая масса) до 0,121% (жирность молока) вариации признаков. Все показатели демонстрируют статистическую значимость ($p=0,00$).

Относительно же продуктивных показателей, то молочная продуктивность демонстрирует умеренное влияние фактора: удой за 305 дней ($R^2=0,020\%$) с F-критерием 8,43; содержание жира ($R^2=0,121\%$) с высоким F-критерием 49,32 и содержание белка ($R^2=0,044\%$) с F-критерием 18,05. Видно, что качественные показатели более чувствительны к влиянию уровня гомозиготности, чем количественные.

Если обратить внимание на воспроизводительные качества, то здесь все показатели демонстрируют схожую степень

влияния фактора. В отличие от всех показателей живая масса коров показывает наименьшее влияние фактора ($R^2=0,015\%$).

Высокие значения F-критерия в целом подтверждают статистическую значимость влияния фактора, при этом наибольшее значение F наблюдается для показателя жирности молока (49,32). Относительно низкие значения остаточной дисперсии также указывают на надежность результатов.

Все это позволяет сделать заключение, что наблюдается избирательное влияние уровня гомозиготности на различные признаки. Наиболее чувствительным показателем оказалась жирность молока. Воспроизводительные же качества демонстрируют умеренную зависимость от такого фактора как уровень гомозиготности по STR- маркерам.

Таблица 5 – Дисперсионный анализ влияния Са быков-производителей на показатели молочной продуктивности и воспроизводства дочерей

Признак	Множественный R	Множественный R ²	Скорректированный R ²	SS (F)	N (F)	MS (F)	SS (O)	N (O)	MS (O)	F	P
Возраст 1 отела, мес.	0.017021	0.000290	0.000265	326	2	163	1.123971E+06	80846	14	11.71427	0.000008
Средний период - 1 л.	0.019379	0.000376	0.000351	214145	2	107072	5.699819E+08	80846	7050	15.18710	0.000000
Дойные дни - 1 л.	0.017562	0.000308	0.000284	159841	2	79920	5.181035E+08	80846	6409	12.47094	0.000004
Удой за 305, кг - 1 л.	0.014443	0.000209	0.000184	33441311	2	16720655	1.602796E+11	80846	1982529	8.43400	0.000218
Жир за 305, % - 1 л.	0.034909	0.001219	0.001194	15	2	7	1.199184E+04	80846	0	49.32042	0.000000

Жир за 305, кг - 1 л.	0.017218	0.000296	0.000272	92467	2	46233	3.117962E+08	80846	3857	11.98790	0.000006
Белок за 305, % - 1 л.	0.021127	0.000446	0.000422	1	2	1	3.044531E+03	80846	0	18.05003	0.000000
Белок за 305, кг - 1 л.	0.016267	0.000265	0.000240	46833	2	23416	1.769430E+08	80846	2189	10.69903	0.000023
Живая масса, кг - 1 л.	0.012558	0.000158	0.000133	24878	2	12439	1.577362E+08	80846	1951	6.37549	0.001704

Примечание: Множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту связи между зависимой переменной и предиктором, множественный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный на число факторов, $SS(F)$ – внутригрупповая изменчивость, $SS(O)$ – дисперсия ошибки, $MS (F)$ – межгрупповой разброс факториальной дисперсии (называемый средним квадратом эффекта), $MS (O)$ – межгрупповой разброс остаточной дисперсии (или дисперсии ошибки), степень свободы (F) – число степеней свободы для фактора (эффекта) $N(F) = r - 1$; в нашем исследовании число фактора (эффектов) $r = 3$, следовательно $N(F) = 3 - 1 = 2$; степень свободы (O) – число степеней свободы для остаточной (случайной) дисперсии $N(O) = N - r$; в нашем исследовании число наблюдений $N = 80849$, следовательно $n(o) = 80849 - 3 = 80846$; F -критерий оценивает статистическую значимость различия средних в группах, P – вероятность ошибочного результата.

Таблица 6 – Взаимосвязь абсолютных показателей молочной продуктивности и воспроизводительных качеств дочерей быков в связи с уровнем геномного инбридинга быков-отцов (F_{лон})

Уровень F _{лон}	Возраст 1 отела, мес.	Сервис период - 1 л.	Дойные дни - 1 л.	Удой за 305, кг - 1 л.	Жир за 305, % - 1 л.	Жир за 305, кг - 1 л.	Белок за 305, % - 1 л.	Белок за 305, кг - 1 л.	Живая масса, кг - 1 л.
(n=12381) до 4,1% 39 быков	27.19± 0.034	151.36± 0.764	364.09± 0.717	6366.82± 12.387	4.09± 0.004	260.83± 0.558	3.22± 0.002	204.87± 0.410	505.85± 0.370
(n=30159) 4,2-7,5% 76 быков	27.31± 0.021*	155.31± 0.483***	366.79± 0.458**	6512.84± 8.148***	4.06± 0.002***	264.37± 0.360***	3.22± 0.001	209.47± 0.272***	508.91± 0.254***
(n=14630) 7,6-10,8% 57 быков	26.98± 0.029***	157.91± 0.695***	368.49± 0.650***	6679.23± 11.630***	4.06± 0.003***/н.д.	270.85± 0.514***	3.22± 0.001	215.21± 0.381***	511.83± 0.361***
(n=6857) более 10,9% 24 быка	27.26± 0.046 ^{н.д./} ^{н.д./***}	159.88± 1.020***	371.30± 0.986***	6458.60± 16.524***	4.03± 0.004***	260.02± 0.719 ^{н.д./} ^{***}	3.20± 0.002***	206.89± 0.550***	509.34± 0.509 ^{н.д./} ^{***}
R	-0,043	0,77	0,58	30,73	-0,0056	0,85	0,00054	1,012	0,77

Примечание: У 305 – удой за 305 дней лактации; МДЖ – массовая доля жира; МЖ – молочный жир; МДБ – массовая доля белка; МБ – молочный белок; ЖМ – живая масса; ВПО – возраст первого отела; СП – сервис-период; ДД – дойные дни; R – коэффициент регрессии

Таблица 7 – Дисперсионный анализ влияния FROH быков-производителей на показатели молочной продуктивности и воспроизводства дочерей

Признак	Множественный R	Множественный R ²	Скорректированный R ²	SS (F)	N (F)	MS (F)	SS (O)	N (O)	MS (O)	F	P
Возраст 1 отела, мес.	0,035998	0,001296	0,001249	1136	3	379	8,752065E+05	64023	14	27,6911	0,00
Сервис период - 1 л.	0,030693	0,000942	0,000895	428218	3	142739	4,541248E+08	64023	7093	20,1235	0,00
Дойные дни - 1 л.	0,025506	0,000651	0,000604	264142	3	88047	4,057484E+08	64023	6338	13,8930	0,00
Удой за 305, кг - 1 л.	0,073790	0,005445	0,005398	688153235	3	22938441 ₂	1,256958E+11	64023	1963292	116,8366	0,00
Жир за 305, % - 1 л.	0,049157	0,002416	0,002370	24	3	8	9,754853E+03	64023	0	51,6939	0,00
Жир за 305, кг - 1 л.	0,060087	0,003610	0,003564	892824	3	297608	2,463944E+08	64023	3849	77,3303	0,00

Белок за 305, % - 1 л.	0,030921	0,000956	0,000909	2	3	1	2,321666E+03	64023	0	20,4239	0,00
Белок за 305, кг - 1 л.	0,075220	0,005658	0,005612	787575	3	262525	1,384067E+08	64023	2162	121,4367	0,00
Живая масса, кг - 1 л.	0,044803	0,002007	0,001961	240973	3	80324	1,198090E+08	64023	1871	42,9235	0,00

Примечание: Множественный коэффициент корреляции, характеризует тесноту связи между зависимой переменной и предиктором, множественный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный R^2 – коэффициент детерминации, скорректированный на число факторов, $SS(F)$ – внутригрупповая изменчивость, $SS(O)$ – дисперсия ошибки, $MS (F)$ – межгрупповой разброс факториальной дисперсии (называемый средним квадратом эффекта), $MS (O)$ – межгрупповой разброс остаточной дисперсии (или дисперсии ошибки), степень свободы (F) – число степеней свободы для фактора (эффекта) ($N(F) = r - 1$; в нашем исследовании число фактора (эффектов) $r = 4$, следовательно $N(F) = 4 - 1 = 3$; степень свободы (O) – число степеней свободы для остаточной (случайной) дисперсии ($N(O) = N - r$; в нашем исследовании число наблюдений $N = 64027$, следовательно $n(o) = 64027 - 4 = 64023$; F -критерий оценивает статистическую значимость различия средних в группах, P – вероятность ошибочного результата.

В таблице 6 представлены основные хозяйственно-полезные показатели дочерей исследуемых быков во взаимосвязи с уровнем геномного инбридинга, так удой за 305 дней лактации варьировался от 6367 при F_{ROH} до 4,1% и до 6458 при более 10,9%, так же наблюдалось снижение массовой доли жира и белка молока с 4,09-4,03% и 3,22-3,20% соответственно. Наблюдалось увеличение сервис-периода с 151,4 до 159,9 дней. Анализ абсолютных показателей молочной продуктивности и фертильности дочерей быков с величиной их геномного инбридинга указывал на положительную сопряженность с изучаемыми признаками. Использование умеренной величины инбридинга позволяет получать более продуктивное и однородное потомство в сравнении с аутбредными животными, при градациях <4,1...7,6-10,8: на +312 кг молока, +10,05 кг МЖ, +10,3 кг МБ.

Регрессионным анализом установлено, что 1% геномного инбридинга в расчёте по *ROH*-паттернам связан с увеличением удоя за 305 дней лактации на 30,73 кг., молочного жира и белка на 0,85 и 1,012 кг. соответственно, при незначительном приросте массовой доли молочного белка (0,00054%) и потере молочного жира (-0,0056%). По показателям воспроизводства заметна положительная направленность к увеличению последних: сервис период +0,77 дн., дойные дни +0,58 дн., живая масса +0,77 кг., за исключением возраста первого отела, он снижается на -0,043 мес.

Демонстрируется также существенное влияние фактора геномного инбридинга быков-производителей на различные показатели продуктивности и воспроизводства их дочерей (Таблица 7).

Множественные коэффициенты корреляции варьируются от 0,0255 до 0,0752. Коэффициенты детерминации показывают, что фактор геномного инбридинга объясняет от 0,06% (дойные дни) до 0,56% (белок в молоке) вариации признаков. Все показатели демонстрируют статистически значимую связь ($p=0,00$). Молочная продуктивность демонстрирует

наиболее выраженное влияние фактора: на удой за 305 дней ($R^2=0,54\%$, $F=116,84$); содержание белка ($R^2=0,56\%$, $F=121,44$) и содержание жира ($R^2=0,24\%$, $F=51,69$). При этом качественные показатели молока показывают различную чувствительность к геномному инбридингу: содержание белка более чувствительно, а содержание жира демонстрирует умеренную зависимость. Воспроизводительные же качества, такие как возраст первого отела ($R^2=0,13\%$) и сервис-период ($R^2=0,09\%$) демонстрируют умеренную зависимость от инбридинга, а дойные дни показывают наименьшую связь с фактором ($R^2=0,06\%$). Живая масса коров имеет умеренную зависимость от геномного инбридинга ($R^2=0,20\%$, $F=42,92$)

Если судить в целом, то высокие значения *F*-критерия свидетельствуют о статистической значимости влияния фактора, а значимые показатели *MS(F)* подтверждают существенность различий между группами. Относительно низкие значения остаточной дисперсии указывают на надежность результатов. Все указывает на то, что наблюдается системное влияние геномного инбридинга на все исследуемые признаки и наиболее чувствительным оказался показатель содержания белка. Воспроизводительные качества демонстрируют умеренную зависимость от фактора.

ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Проведенное исследование демонстрирует комплексное влияние различных форм инбридинга на продуктивные и воспроизводительные качества молочного скота. Анализ данных позволяет сделать определенные выводы.

Установлена оптимальная степень классического инбридинга (0-3.125%). Также выявлена тенденция к снижению жирномолочности при увеличении степени инбридинга. Показана эффективность использования оптимального уровня геномного инбридинга в пределах 4.2-7.5% для получения высокопродуктивного потомства. Установлена зависимость между уровнем гомозиготности по STR-

маркерам и продуктивными качествами. Также определена оптимальная степень гомозиготности для достижения максимальной продуктивности. Доказана статистическая значимость влияния всех форм инбридинга ($p=0.00$).

В качестве практических предложений можно рекомендовать использовать умеренный классический инбридинг в пределах 0-3.125%; контролировать уровень геномного инбридинга в диапазоне 4.2-7.5% и учитывать уровень гомозиготности по STR-маркерам при подборе пар, а также проводить регулярный мониторинг показателя продуктивности и воспроизводства.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE LEVEL OF HOMOZYGOSITY AND GENOMIC INBREEDING OF HOLSTEIN AND BLACK-PIED STUD BULLS ON DAIRY PRODUCTIVITY INDICATORS AND REPRODUCTION OF DAUGHTERS

Nedashkovsky I.S.^{1*} – candidate of biology, senior scientific researcher, Head of the National Catalog Department of the National Center for Genetic Resources of Farm Animals (ORCID 0000-0003-0487-4576); **Conte A.F.**² – candidate of agricultural sciences, senior scientific researcher of population genetics and animal breeding department (ORCID 0000-0003-4877-0883); **Koltsov D.N.**³ – doctor of biology, director (ORCID 0000-0002-3977-8552); **Volkova V.V.**⁴ – candidate of biology, senior scientific researcher of laboratory of DNA technologies in animal husbandry (ORCID 0000-0002-2080-0182); **Sermyagin A.A.**⁵ – candidate of agricultural sciences, director (ORCID 0000-0002-1799-6014)

^{1,2,4}L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

³Federal Research Center for Bast Fiber Crops

⁵All-Russian Research Institute of Genetics and Breeding of Farm Animals, branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center for Animal Husbandry - VIZh named after Academician L.K. Ernst

* nedashkovsky_is@mail.ru

Financing: The study was supported by framework of the state assignment №124020200029-4 (FGGN-2024-0013).

ABSTRACT

A study was conducted to investigate the impact of genomic inbreeding (FROH) and the level of homozygosity (Ca) on milk productivity and reproduction. To assess the impact of FROH, data on SNP markers from 196 sires were used; FROH was then assigned to daughters ($n=64,027$). FROH was calculated as the ratio of the sum of all lengths of homozygosity patterns (ROH) in million nucleotide pairs (mb) in the sire genome to the total genome size in mb for 29 bovine autosomes overlapping SNPs, expressed as a percentage. To calculate the impact of inbreeding (Fx), 196 bulls and 64,027 daughters were used, and Ca for STR markers from 228 bulls and 80,849 daughters was used. To assess the influence of the cows' own Fx, a dataset of 39,276 heads was used. Fx was calculated using the Wright-Kislovsky formula, the Ca level as the ratio of the number of homozygous loci to the total number of analyzed loci. The optimal Fx level for obtaining high milk productivity indicators is the range of 0-3.125%. A high level of inbreeding (6.25-12.5%) negatively affects milk fat content. Thus, a reliable relationship was established between the level of inbreeding for STR markers and the productive qualities of daughters. From the point of view of milk productivity, the minimum level of inbreeding is optimal. All indicators demonstrate statistical significance ($p=0.00$). A systemic effect of genomic inbreeding on all the studied traits is observed, and the protein content indicator turned out to be the most sensitive. Reproductive qualities demonstrate a moderate dependence on the factor. As practical suggestions, it is possible to recommend using moderate classical inbreeding within 0-3.125%; control the level of genomic inbreeding in the range of 4.2-7.5% and take into account the level of homozygosity for FROH and STR markers when selecting pairs, as well as conduct reg-

ular monitoring of productivity and reproduction indicators.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Недашковский, И. С. Оценка влияния уровня инбридинга на молочную продуктивность и воспроизводительные качества коров голштинизированной популяции черно-пестрой породы / И.С. Недашковский, А.А. Сермягин, Т.В. Богданова, А.Н. Ермилов, И.Н. Янчуков, Н.А. Зиновьева // Молочное и мясное скотоводство. – 2018. – № 7. – С. 17-22. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36613447>
2. Недашковский, И.С. Оценка племенной ценности быков-производителей голштинской породы по качеству потомства в связи с уровнем гомозиготности по STR-маркерам / И.С. Недашковский, О.В. Костюнина, В.В. Волкова, А.Н. Ермилов, А.А. Сермягин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2019. – № 3(43). – С. 36-42. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41485488>
3. Недашковский, И.С. Влияние уровня геномного инбридинга, оцененного по ROH-паттернам, на воспроизводительные качества и молочную продуктивность дочерей, а также спермопродукцию голштинских быковпроизводителей / И.С. Недашковский, А.А. Сермягин, О.В. Костюнина, И.Н. Янчуков, Н.А. Зиновьева // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35, – № 3. – С. 39-45. – DOI 10.24411/0235-2451-2021-10307. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45719024>
4. Недашковский, И.С. Влияние уровня гомозиготности по STR-маркерам быков-производителей голштинской породы на показатели наследования типа телосложения их дочерей на основе линейной оценки / И.С. Недашковский, А.Ф. Контэ, В.В. Волкова, А.А. Сермягин // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 4(68). – С. 294-302. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-04-35. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50237879>

5. Недашковский, И.С. Влияние уровня геномного инбридинга голштинских быков-производителей на изменчивость показателей экстерьера и тип телосложения их дочерей / И.С. Недашковский, А.Ф. Контэ, А.А. Сермягин // Достижения науки и техники АПК. – 2023. – Т. 37. – № 6. – С. 66-74. – DOI 10.53859/02352451_2023_37_6_66. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54278234>
6. Недашковский, И.С. Влияние уровня инбридинга коров голштинской породы на оценку их типа телосложения / И.С. Недашковский, А.Ф. Контэ, Е.Н. Нарышкина, А.А. Сермягин // Молочное и мясное скотоводство. – 2023. – № 2. – С. 3-6. – DOI 10.33943/MMS.2023.36.93.002. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=51417048>
7. Недашковский, И.С. Влияние уровня инбридинга у коров голштинской и черно-пестрой пород на частоту встречаемости недостатков экстерьера / И.С. Недашковский, А.Ф. Контэ, А.А. Сермягин // Молочное и мясное скотоводство. – 2024. – № 3. – С. 11-15. – DOI 10.33943/MMS.2024.88.77.003. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67948580>
8. Недашковский, И.С. Параметры генетической взаимосвязи по STR- и SNP-маркерам недостатков экстерьера дочерей голштинских быков-производителей с уровнем гомозиготности и геномного инбридинга отцов / И.С. Недашковский, А.Ф. Контэ, А.А. Сермягин // Достижения науки и техники АПК. – 2024. – Т. 38. – № 2. – С. 46-52. – DOI 10.53859/02352451_2024_38_2_46. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65637072>
9. Герасимова, А. С. Влияние типов подбора и степени инбридинга на продуктивные качества в селекции молочного скота племзавода "Рыбковское" / А. С. Герасимова, Е. А. Прищеп, Д. В. Леутина, О. В. Татуева // Вестник аграрной науки. – 2020. – № 2(83). – С. 45-50. – DOI 10.17238/issn2587-666X.2020.2.45. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42808956>

10. Аширматова, В. Н. Влияние степеней инбридинга на живую массу и молочную продуктивность чёрно-пёстрых коров / В. Н. Аширматова, Л. И. Анисимова // Сетевой научный журнал ОрелГАУ. – 2017. – № 1(8). – С. 40-42. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29764816>
11. Иванова, И.П. Влияние степеней инбридинга на хозяйственно-полезные качества молочного скота / И.П. Иванова, Н.А. Юрк // Молочнохозяйственный вестник. – 2021. – №2 (42), II кв. – С. 62-71. – DOI 10.52231/2225-4269 2021_2_62 Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46423624>
12. Любимов, А. И. Влияние различных типов инбридинга на молочную продуктивность и воспроизводительные качества коров черно-пестрой породы / А.И. Любимов, В.М. Юдин, К.П. Никитин // Аграрный вестник Урала. – 2016. – № 5 (147). – С. 56-60. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26168296>
13. Руденко, О. В. Влияние различных степеней инбридинга на интенсивность роста ремонтных телок // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1(57). – С. 188-193. – DOI 10.18286/1816-4501-2022-1-188-193. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48723817>
14. Грачев, В. С. Влияние инбридинга на показатели онтогенеза, продуктивности и долголетия молочных коров / В.С. Грачев, С.А. Брагинец, А.Ю. Алексеева // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2(67). – С. 91-99. – DOI 10.24412/2078-1318-2022-2-91-99. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48956089>
15. Шендаков, А. И. Влияние аутбридинга и инбридинга на результаты отёлов чёрно-пёстрых коров при средней кровности по голштинам (HF) 49,3-60,2% / А.И. Шендаков, Т.А. Шендакова, Р.Н. Ляшук // Биология в сельском хозяйстве. – 2024. – № 4(45). – С. 2-6. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=76803170>
16. Руденко, О. В. Показатели воспроизводства коров при разной степени инбридинга / О.В. Руденко // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2022. – Т. 17. – № 3. – С. 360-372. – DOI 10.22363/2312-797X-2022-17-3-360-372. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49508136>
17. Babik, N.P., Fedorovych, Ye.I. Influence of outbreeding and inbreeding on the productive longevity of dairy cows / N.P. Babik, Ye.I. Fedorovych // Scientific Messenger LNUVMB. – 2017. – 19(79). – P. 3-8. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-autbridinga-i-inbridinga-na-produktivnoe-dolgoletie-korov-molochnih-porod>
18. Лещук, Г. П. Продуктивные качества черно-пестрых коров в связи с типом телосложения и производственной типичностью / Г.П. Лещук // Агропродовольственная политика России. – 2012. – № 3. – С. 73-75. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18870810>
19. Степанов, А. В. Влияние кратности доения на молочную продуктивность голштинизированных коров-первотелок в условиях промышленной технологии производства молока Северного Зауралья / А.В. Степанов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 10(37). – С. 100-103. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13010943>
20. Чеченихина, О. С. Удои коров черно-пестрой породы в зависимости от генетических и технологических факторов / О.С. Чеченихина // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 12. – С. 51-54. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18819458>
21. Peakall, R. GenAIEx 6.5: genetic analysis in Excel // Population genetic software for teaching and research update / R. Peakall, P.E. Smouse // Bioinformatics. – 2012. Vol. 28. – P.2537-2539. Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22820204/>
22. Chang, C. C. Second-generation PLINK: Rising to the challenge of larger and richer datasets / C.C. Chang, C.C. Chow, L. Tellier et al. // GigaScience. – 2015. – Vol.4. – №7. Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25722852/>

23. Zhang, L. egaTOH: Extended approach for identifying tracts of homozygosity / L. Zhang, M.S. Orloff, S. Reber S. et al. // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8. – №. 3. – P. e57772. Режим доступа: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0057772>
24. Purfield, C. Runs of homozygosity and population history in cattle / C. Purfield, D. Berry, S. McParland S. et al. // BMC Genetics. – 2012– Vol.13. – № 70. Режим доступа: <https://bmcgenomdata.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2156-13-70>
25. Смарагдов, М. Г. Полногеномная оценка инбридинга у молочного скота / М.Г. Смарагдов, А.А. Кудинов // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – Т. 33. – № 6. – С. 51–53. – DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10612. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39179451>
26. Ерохин, А.И. Инбридинг и селекция животных / А.И. Ерохин, А.П. Солдатова, А.И. Филатов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 156 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/002744_000053_RU_%D0%93%D0%9F%D0%9D%D0%A2%D0%91+%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8_KNB_IBIS_45.3_%D0%9577-867639/
27. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с. Режим доступа: <https://www.klex.ru/1oe4>
28. Юденков, В.А. Дисперсионный анализ / В.А. Юденков. – Минск: Бизнесофсет, 2013. – 76с. Режим доступа: https://www.studmed.ru/yudenkov-v-a-dispersionnyy-analiz_9180460d1ff.html
- REFERENCES**
1. Nedashkovsky, I.S. Evaluation of inbreeding effect for milk production and fertility traits black-and-white cattle improved by holstein breed / I.S. Nedashkovsky, A.A. Sermyagin, T.V. Bogdanova, A.N. Ermilov, I.N. Yanchukov, N.A. Zinovieva // Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2018:7:17–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36613447> (In Russ.)
2. Nedashkovsky, I.S. Estimation of the breeding value of holstein sire by the quality of offspring in connection with the homozygosity level calculated by STR-markers / I.S. Nedashkovsky, O.V. Kostunina, V.V. Volkova, A.N. Ermilov, A.A. Sermyagin // Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev. 2019:3(43):36-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41485488> (In Russ.)
3. Nedashkovsky, I.S. Influence of the level of genomic inbreeding assessed by ROH-patterns on reproductive qualities and milk productivity of daughters and sperm productivity of holstein sires / I.S. Nedashkovsky, A.A. Sermyagin, O.V. Kostyunina, I.N. Yanchukov, N.A. Zinovieva // Achievements of Science and Technology of AIC. 2021:35(3):39-45. – DOI 10.24411/0235-2451-2021-10307. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45719024> (In Russ.)
4. Nedashkovsky, I.S. The influence of the level of homozygosity for STR-markers of holstein sires on the indicators of inheritance of the body type of their daughters on the basis of linear assessment / I.S. Nedashkovsky, A.F. Konte, V.V. Volkova, A.A. Sermyagin // Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex. 2022:4(68):294-302. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-04-35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50237879> (In Russ.)
5. Nedashkovsky, I.S. Influence of the level of genomic inbreeding holstein and black-and-white sires on genetic variability and evaluation of the estimated breeding value of the body type of their daughters. / I.S. Nedashkovsky, A.F. Konte, A.A. Sermyagin // Achievements of Science and Technology of AIC. 2023:37(6): 66-74. – DOI 10.53859/02352451_2023_37_6_66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54278234> (In Russ.)
6. Nedashkovsky, I.S. Influence of the level of inbreeding of daughters of holstein and black mottled sires on the assessment of their body type / I.S. Nedashkovsky, A.F. Konte, E.N. Naryshkina, A.A. Sermyagin // Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2023:2:3-6. – DOI 10.33943/

- MMS.2023.36.93.002. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=51417048> (In Russ.)
7. Nedashkovsky, I.S. Influence of the level of inbreeding of holstein and black-and-white cows on the frequency of exterior defects / I.S. Nedashkovsky, A.F. Conte, E.N. A.A. Sermyagin // Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2024:3:11-15. – DOI 10.33943/MMS.2024.88.77.003. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67948580> (In Russ.)
8. Nedashkovsky, I.S. Parameters of genetic correlation by str and snp markers of defects in the exterior of daughters of holstein sires with the level of homozygosity and genomic inbreeding of fathers / I.S. Nedashkovsky, A.F. Conte, E.N. A.A. Sermyagin // Achievements of Science and Technology of AIC. 2024:38(2):46-52. – DOI 10.53859/02352451_2024_38_2_46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65637072> (In Russ.)
9. Gerasimova, A.S. The influence of selection types and inbreeding degree on productive qualities in dairy cattle selection of the breeding factory "Rybkovskoye" / A.S. Gerasimova, E.A. Prishchep, D.V. Leutina, O.V. Tatueva // Bulletin of agrarian science. 2020:2(83):45-50. – DOI 10.17238/issn2587-666X.2020.2.45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42808956> (In Russ.)
10. Ashirmatova, V. N. The influence of inbreeding degrees on live weight and milk productivity of black-and-white cows / V. N. Ashirmatova, L. I. Anisimova // Online scientific journal of OrelSAU. 2017:1(8):40-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29764816> (In Russ.)
11. Ivanova, I.P., Yurk N.A. Influence of degrees of inbreeding on the economic and useful qualities of dairy cattle / I.P. Ivanova, N.A. Yurk // Dairy Bulletin. 2021:2(42):62-71 – DOI 10.52231/2225-4269_2021_2_62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46423624> (In Russ.)
12. Lubimov, A.I. Effect of different types of inbreeding on dairy products efficiency and reproductive qualities of cows of black-motley breed / A.I. Lubimov, V.M. Yudin, K.P. Nikitin // Agrarian Bulletin of the Urals. 2016:5(147):56-60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26168296> (In Russ.)
13. Rudenko, O.V. Influence of various inbreeding degrees on growth intensity of replacement heifers / O.V. Rudenko // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2022:1(57):188-193. – DOI 10.18286/1816-4501-2022-1-188-193. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48723817> (In Russ.)
14. Grachev, V.S. Influence of inbreeding on indicators of ontogenesis, productivity and longevity of dairy cows / Grachev V.S., Braginets S.A., Alekseeva A.YU. // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022:(67):91-99. – DOI 10.24412/2078-1318-2022-2-91-99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48956089> (In Russ.)
15. Shendakov, A.I. The influence of outbreeding and inbreeding on the results of calving of black-and-white cows with an average percentage of holstein genes (hf) of 49.3-60.2% / A.I. Shendakov, T.A. Shendakova, R.N. Lyashuk // Biology in agriculture. 2024:4(45):2-6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=76803170> (In Russ.)
16. Rudenko, O.V. Cow reproduction rates with varying inbreeding degrees / O.V. Rudenko // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2022:17(3):360-372. – DOI 10.22363/2312-797X-2022-17-3-360-372. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49508136> (In Russ.)
17. Babik, N.P. Influence of outbreeding and inbreeding on the productive longevity of dairy cows / N.P. Babik, Ye.I. Fedorovich // Scientific Messenger LNUVMB. 2017:19(79):3-8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-autbridinga-i-inbridinga-na-produktivnoe-dolgoletie-korov-molochnih-porod>. (In Russ.)
18. Leschuk, G. P. Productive qualities of black-and-white cows in connection with body type and production typicality / G. P. Leschuk // Agro-food policy in Russia. 2012:3:73-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18870810> (In Russ.)
19. Stepanov. A.V. Milking order influence on milk efficiency of holsteins fresh cows in the conditions of industrial technology of milk production in the north zauraliye / A.V.

- Stepanov // the Bulletin of KrasGAU. 2009:10(37):100-103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13010943> (In Russ.)
20. Tchetchenihina, O.S. Milking cows of black-breed depending on genetic and technological factors / O.S. Tchetchenihina // Achievements of Science and Technology of AIC. 2012:12:51-54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18819458> (In Russ.)
21. Peakall, R. GenA1Ex 6.5: genetic analysis in Excel // Population genetic software for teaching and research update / R. Peakall, P. E. Smouse // Bioinformatics. 2012:28:2537-2539. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22820204/>
22. Chang, C. C. Second-generation PLINK: Rising to the challenge of larger and richer datasets / C. C. Chang, C. C. Chow, L. Tellier et al. // GigaScience. 2015:4(7). URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25722852/>
23. Zhang, L. cgaTOH: Extended approach for identifying tracts of homozygosity / L. Zhang, M.S. Orloff, S. Reber S. et al. // PLoS ONE. 2013:8(3):e57772. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0057772>
24. Purfield, C. Runs of homozygosity and population history in cattle / C. Purfield, D. Berry, S. McParland S. et al. // BMC Genetics. 2012:13(70). URL: <https://bmcgenomdata.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2156-13-70>
25. Smaragdov, M.G. Full genome inbreeding assessment of dairy cattle / M.G. Smaragdov, A.A. Kudinov // Achievements of Science and Technology of AIC. 2019:33(6):51-53/ – DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10612. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39179451> (In Russ.)
26. Erokhin, A.I. Inbreeding and selection of animals / A.I. Erokhin, A.P. Soldatova, A.I. Filatov. – Moscow: Agropromizdat, 1985:157. URL: https://rusneb.ru/catalog/002744_000053_RU_%D0%93%D0%9F%D0%9D%D0%A2%D0%91+%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8_KNB_IBIS_45.3_%D0%9577-867639/ (In Russ.)
27. Kobzar, A. I. Applied Mathematical Statistics / A. I. Kobzar. – Moscow: Fizmatlit, 2006:816. URL: <https://www.klex.ru/1oe4> (In Russ.)
28. Yudenkov, V.A. Dispersion analysis / V.A. Yudenkov. – Minsk: Businessoffset, 2013:76. URL: https://www.studmed.ru/yudenkov-v-a-dispersionnyy-analiz_9180460d1ff.html (In Russ.)