

РАЗВЕДЕНИЕ, СЕЛЕКЦИЯ, ГЕНЕТИКА И БИОТЕХНОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ / BREEDING, SELECTION, GENETICS AND BIOTECHNOLOGY OF ANIMALS

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.6>

ОЦЕНКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ГЕНОВ КАЗЕИНОВЫХ БЕЛКОВ И ГЕНОВ ЛИПИДНОГО ОБМЕНА У КОРОВ СИММЕНТАЛЬСКОЙ ПОРОДЫ

Научная статья

Зарипов О.Г.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-7493-4410;

¹ Федеральный исследовательский центр животноводства имени Л.К. Эрнста, Подольск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zarog[at]mail.ru)

Аннотация

В работе представлено исследование генетического разнообразия по генам каппа-казеина (CSN3), бета-казеина (CSN2), 1-ацилглицерин-3-фосфат-О-ацилтрансфераза и Стерол-СоА десатураза 1 (SCD1) коров симментальской породы. Образцы ушных выщипов для генотипирования были получены из Орловской области. Исследование проводилось с применением методики ПЦР с гибридизационно-флюоресцентной детекцией в режиме «реального времени» по разработанным нами и оптимизированным методикам. В результате нами были определены частоты встречаемости аллелей и генотипов исследуемых генов. Отклонение по Харди-Вайнбергу для генов AGPAT6, CSN3 и CSN2 не наблюдалось, в то же время для гена SCD1 выявлено смещение генетического равновесия.

Ключевые слова: генотипирование, симментальская порода, гены казеиновых белков, гены липидного обмена, аллельный полиморфизм.

EVALUATION OF GENETIC DIVERSITY OF CASEINIC PROTEIN GENES AND LIPID METABOLISM GENES IN SIMMENTAL COWS

Research article

Zaripov O.G.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-7493-4410;

¹ Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Russian Federation

* Corresponding author (zarog[at]mail.ru)

Abstract

This work presents a study of genetic diversity in kappa-casein (CSN3), beta-casein (CSN2), 1-acylglycerol-3-phosphate-O-acyltransferase and Sterol-CoA desaturase 1 (SCD1) genes of cows of Simmental breed. Ear pluck samples for genotyping were obtained from Orel region. The research was carried out using PCR with hybridisation-fluorescence detection in "real time" mode according to the methods developed and optimized by us. As a result, we determined the frequencies of alleles and genotypes of the studied genes. No Hardy-Weinberg deviation was observed for the AGPAT6, CSN3 and CSN2 genes, while a shift in genetic balance was detected for the SCD1 gene.

Keywords: genotyping, Simmental breed, caseinic protein genes, lipid metabolism genes, allelic polymorphism.

Введение

Оценка факторов, влияющих на изменчивость технологических свойств молока, может являться критерием, по которому возможен отбор животных в селекционном процессе. К таким факторам зачастую относят породу, условия кормления, возраст и генотип животного. Влияние технологических свойств на производственные процессы, такие как производство сливочного масла, молочных консервов или выработка сыра зависит от содержания основных компонентов молока – % жира и % белка, соотношения ненасыщенных и насыщенных жирных кислот, термостабильности и способности к сычужному свертыванию [1], [2], [3], [4]. Учёт при подборе животных их генотипов по селекционно-значимым генам позволит создавать стада, производящие молоко с оптимальными для его переработки характеристиками [5], особенно для симментальской породы, молоко которой по содержанию % жира и % белка является максимально оптимальным для промышленного использования.

Из имеющихся технологических свойств возможно контролировать и улучшать насыщенность жирных кислот, термостабильность и сычужное свертывание с применением маркерной-селекции. Влияние таких генов, как 1-ацилглицерин-3-фосфат-О-ацилтрансфераза (AGPAT6) и Стерол-СоА десатураза 1 (SCD1) принято ассоциировать с массовой долей жира и его насыщенностью [6], [7], [8], а аллельные полиморфизмы по генам каппа- и бета-казеина с массовой долей белка, и соответственно, с термостабильностью и выходом творога и сыра [9], [10], [11]. Таким образом, целью нашей работы было установление генетического разнообразия по генам казеиновых белков – каппа- и бета казеина и генам липидного обмена – AGPAT6 и SCD1 у коров симментальской породы.

Методы и принципы исследования

Исследования проводились на животных симментальской породы (n=298) (Орловская область). Геномная ДНК выделялась с использованием набора «ДНК-Экстран-2» производства НПО «СИНТОЛ» из выщипов ушных раковин.

Реакцию амплификации проводили в 15 мкл смеси ПЦР, содержащей 3 мкл реактива qPCRMix-HS («Евроген», Россия), по 3 рМ прямого и обратного праймеров, и аллель-специфичных ДНК-зондов (таблица1) и 10 нг ДНК.

Таблица 1 - Последовательности используемых олигонуклеотидных праймеров и ДНК-зондов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.6.1>

Каппа-казеин (CSN3)		[12]
CSN3_F: 5'-AGA GCC CAC CTG AGA TCA AC-3'		
CSN3_R: 5'-TCT TGG CTG TTA TTC ATT TTG C-3'		
CSN3_B: 5'-FAM-CAA CTG CGG TCT AAA TAC TCT AAG GAG-BHQ1-3'		
CSN3_A: 5'-HEX-CAA CTG CAG TCT AAA AAC TCT AAG GAG-BHQ1-3'		
Бета-казеин (CSN2)		[13]
CSN2-f: 5'-CTT TGC CCA GAC ACA GTC TCT AGT-3'		
CSN2-r: 5'-GCA CCA CCA CAG GGG TT-3'		
CSN2_A1: 5'-FAM-CTG GAC CCA TCC ATA ACA GCC TCC C-BHQ1-3'		
CSN2_A2: 5'-HEX-TGG ACC CAT CCC TAA CAG CCT CCC-BHQ1-3'		
1-ацилглицерин-3-фосфат-О-ацилтрансфераза (AGPAT6)		[14]
AGPAT6-F: 5'-CCA GAA AGG CTG GAG GAG TT-3'		
AGPAT6-R: 5'-ATT CCC AGA AGC ACA GTT TAG T T-3'		
AGPAT6_G: 5'-FAM-CAA GAA AAT GTG ACG GTA-BHQ1-3'		
AGPAT6_T: 5'-HEX-CAA GAA AAT TTG ACG GTA T-BHQ1-3'		
Стерол-КоА десатураза 1 (SCD1)		[15]
SCD1-F: 5'-CCC TTA TGA CAA GAC CAT CAA CC-3'		
SCD1-R: 5'-GAC GTG GTC TTG CTG TGG ACT-3'		
SCD1-T: 5'-FAM-CTT ACC CAC AGC TCC CA-BHQ1-3'		
SCD1-C: 5'-HEX-TAC CCG CAG CTC CC-3-BHQ1		

ПЦР в «реальном времени» генов проводили с помощью прибора Bio-Rad CFX96 в оптимизированных условиях: для AGPAT6 и SCD1: 37 °C – 5 мин.; 95 °C – 10 мин.; 95 °C – 20 сек., 55 °C – 30 сек., 72 °C 20 сек., 40 циклов, для CSN3 и CSN2: 37 °C – 5 мин.; 94 °C – 5 мин.; 94 °C – 15 сек., 60 °C – 60 сек., 40 циклов. Детекция флуоресценции проводилась на стадии элонгации по каналам FAM и HEX. Аллельная дискриминация оценивалась посредством программного обеспечения Bio-Rad CFX Manager.

Описательные статистические параметры (среднее арифметическое, ошибка, стандартное отклонение) вычислялись при помощи пакета «Анализ данных» в среде MSExcel 2013.

Основные результаты

По итогам генотипирования были идентифицированы по 3 генотипа каждого из исследуемых генов (таблица 2).

Таблица 2 - Частоты аллелей и генотипов генов SCD1 и AGPAT6 у голштинизированного черно-пестрого скота опытного хозяйства

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.6.2>

	Частоты генотипов			Частоты аллелей		χ^2	p-value
	ТТ	ТС	СС	Т	С		
SCD1	0,215	0,415	0,37	0,42	0,58	6,2	0,045
AGPAT6	0,418	0,425	0,157	0,63	0,37	2,0	0,37

CSN3	AA	AB	BB	A	B	2,4	0,3
	0,54	0,36	0,1	0,72	0,28		
CSN2	A ₁ A ₁	A ₁ A ₂	A ₂ A ₂	A ₁	A ₂	0,8	0,68
	0,15	0,44	0,41	0,37	0,63		

В рамках исследуемой выборки симментальских коров минимальные частоты встречаемости были выявлены у генотипов TT гена SCD1 – 0,215 и AGPAT6 – 0,157, генотипа BB гена каппа-казеина – 0,1 и генотипа A₁A₁ гена бета-казеина. Частоты встречаемости каждого аллеля равномерно распределялись по выборке. Отклонений фактического распределения частот генотипов от теоретического согласно закону Харди-Вайнберга не наблюдалось, кроме гена SCD1, где нами было выявлено смещение равновесия.

Стерол-СоА десатураза 1 является одним из ключевых ферментов, играющих важную роль в синтезе и метаболизме жирных кислот, т.к. отвечает за образование двойной связи между 9 и 10 атомами углерода и превращением средне- и длинноцепочечных жирных кислот в их ненасыщенные аналоги. Ген SCD1, кодирующий соответствующий фермент, располагается на 26 бычьей хромосоме и у него обнаружены SNP в 3' нетранслируемой области [16] и 5-м экзоне. В исследуемом полиморфизме с.878C>T в 3-м экзоне [17] рядом работ показаны ассоциации аллеля С с такими признаками продуктивности, как массовая доля жира и белка [18], [19], а также содержание мононенасыщенных жирных кислот [6], [20], [21]. Интерес к исследованию данного гена проявляется, в первую очередь, из-за его влияния на содержание ненасыщенных жирных кислот, что отражается на качестве молочной и мясной продукции, а также снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний [22]. По этой причине исследования полиморфизма SCD1 проводились в основной массе на голштинской [23], [24] и мясных породах [25], [26], а среди отечественных исследователей на голштинской [27], голштинизированной черно-пестрой [28] и айширской [29]. Согласно вышеуказанным исследованиям, общей особенностью данного гена являлась низкая частота встречаемости аллеля Т (0,07 – 0,27) и, соответственно, гомозиготного генотипа TT (0,05 – 0,16). В противовес указанным данным, в нашем исследовании по симментальскому скоту частоты встречаемости аллельных вариантов гена SCD1 оказались практически одинаковыми Т – 0,42, С – 0,57, а самым распространенным генотипом – гетерозиготный СТ – 0,415. Выявленное отклонение распределения частот возможно связано с давлением отбора вследствие того, что молоко симментальских коров является оптимальным по соотношению содержания жира и белка для сыроварения и переработки, а SCD1 отвечает за содержание ненасыщенных жирных кислот, влияющих на тягучесть молочного жира. Но данное утверждение требует более детального анализа аллельного полиморфизма SCD1 на взаимосвязь с технологическими свойствами молока.

AGPAT6, располагающийся на 27 бычьей хромосоме, является наиболее экспрессируемой изоформой ферментов семейства 1-ацилглицерин-3-фосфатацилтрансфераз (AGPATs) в молочной железе крупного рогатого скота в период лактации. Принято считать, что он связан с показателем жирномолочности и оказывает существенное влияние на синтез триглицеридов, катализируя присоединения ацильных групп к глицерин-3-фосфату [8]. Также показано, что нокдаун данного гена приводит к существенным изменениям в содержании триглицеридов и размерах липидных капель в молоке [30], а некоторые SNP в промотерной зоне влияют на его сплайсинг и получение редуцированных форм фермента [31]. Полученные нами результаты показывают о снижении частоты гетерозиготности – 0,425, в пользу увеличения гомозиготного генотипа GG – 0,418 у коров симментальской породы в сравнении с голштинизированной черно-пестрой породой, где преобладал гетерозиготный генотип – 0,51 [28].

Бета – и каппа-казеины, составляющие основную массу казеиновых белков в молоке, кодируются одноименными генами – CSN2 и CSN3, располагающимися на 6-й бычьей хромосоме. Казеиновые белки, играющие основную роль в коагуляции молока, позволяют оценивать аллельный полиморфизм их генов как влияние на технологические свойства молока и пригодность к сыроварению [5]. В дополнение этому, в последние десятилетия, бета-казеин рассматривается с точки зрения продовольственной безопасности, а именно, влияние A₁-изоформы белка как пищевого аллергена [32]. Аллель В гена каппа-казеина, ассоциированная с повышенным содержанием белка в молоке, а также лучшими коагуляционными свойствами молока, имеет низкую частоту встречаемости у голштинской и голштинизированной черно-пестрой породы, как и у отечественных пород, так и иностранной селекции – 0,3, что обеспечивается за счет гетерозиготного генотипа АВ, т.к. гомозиготный генотип ВВ может встречаться не во всех популяциях или с очень низкой частотой – 0,09 [11]. Распределение генотипов CSN3 в симментальской породе в большей степени аналогично голштинской и превалирует А-аллель CSN3 – до 0,72 [33]. Результаты, полученные в нашем исследовании можно считать идентичными, т.к. частота встречаемости аллеля В и генотипа ВВ, составили – 0,28 и 0,1, соответственно.

Ситуация с приоритетным аллелем А₂ гена бета-казеина значительно отличается от аллеля В каппа-казеина. Являясь аллелем «дикого типа», а также в результате активного продвижения тренда на «здоровое молоко А₂», частота встречаемости данного аллеля (0,6-0,65), а также гомозиготного генотипа А₂А₂ (0,4) значительно превосходит аллель А₁ и генотип А₁А₁ – 0,3-0,37 и 0,14, соответственно [34], [10], [11]. Сопоставимые результаты были получены нами на симментальской породе: А₂ – 0,63; А₂А₂ – 0,41.

Анализ межгенного взаимодействия показал наличие 64 комбинированных генотипа из 81 возможных с частотами встречаемости от 0,4% до 4,8%. Среди казеиновых белков максимальные частоты встречаемости у комбинированных генотипов (CSN3-CSN2) были у ААА₁А₂-25,9% и ААА₂А₂-20%, лучшие же генотипы ВВА₂А₂ и АВА₂А₂ встречались значительно реже – 5,2% и 14,3%, соответственно. Наиболее распространёнными комбинированными генотипами у генов липидного обмена (AGPAT6-SCD1) являлись GTCT– 20,3%, при этом наилучший вариант генотипа по продуктивности [28] GGCT был вторым по распространенности – 18,3%.

Заклучение

В рамках данной работы рассмотрено генетическое разнообразие по генам липидного обмена и казеиновым белкам молока у коров симментальской породы. Распределение частот встречаемости для гена SCD1 составило TT-0,215, TC-0,415, CC-0,37; для гена AGPAT6 составило GG-0,418, GT-0,425, TT-0,157; для гена CSN3 составило AA-0,54, AB-0,36, BB-0,1 и для гена CSN2 A₁A₁-0,15, A₁A₂-0,44 и A₂A₂-0,41. Наиболее часто встречаемые генотипы среди генов казеиновых белков были AAA₁A₂, а среди генов липидного обмена – GTCT.

Использование полученных данных позволит провести дальнейшие исследования по оценке влияния аллелей исследуемых генов на продуктивность и жирнокислотный состав молока с использованием смешанных моделей в рамках методологии BLUP, а также с применением вложенных факторов, в которых генотип будет являться элементом такого фактора.

Финансирование

Исследования выполнены по теме государственного задания Минобрнауки России № 124020200029-4.

Funding

Research carried out on the topic of a state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia № 124020200029-4.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bobe G. Short Communication: estimates of genetic variation of milk fatty acids in US Holstein cows / G. Bobe, J.A. Minick-Bormann, G.L. Lindberg [et al.] // Journal Of Dairy Science. — 2008. — Vol. 91. — P. 1209–13. — URL: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0252> (accessed: 19.08.2024).
2. Зарипов О.Г. Генотипирование крупного рогатого скота по генам бета-лактоглобулина и каппа-казеина методами ДНК-технологии: дис. ... канд. биол. наук: 03.01.04 : защищена 2010-03-25 : утв. 2010-04-20 / О.Г. Зарипов. — Казань, 2010. — 130 с.
3. Gorelik O.V. Fiziko-himicheskie pokazateli i tehnologicheskie svojstva moloka korov v zavisimosti ot linejnogo proishozhdenija [Physico-chemical parameters and technological properties of cow's milk depending on linear origin] / O.V. Gorelik, A.S. Gorelik, N.A. Fedoseeva [et al.] // Agrarian Science. — 2023. — № 372(7). — P. 53–57. [in Russian]
4. Ахметов Т.М. Состав молока и его физико-химические показатели у коров с разными генотипами каппа-казеина / Т.М. Ахметов, С.В. Тюлькин, О.Г. Зарипов [и др.] // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. — 2009. — Т. 196. — 49 с.
5. Погребняк В.А. Применение результатов диагностики генетического полиморфизма β- и κ-казеинов / В.А. Погребняк, А.В. Колбас, Н.А. Морковкина // Молочное и мясное скотоводство. — 2019. — № 5. — С. 18–22.
6. Samkova E. Associations among Farm, Breed, Lactation Stage and Parity, Gene Polymorphisms and the Fatty Acid Profile of Milk from Holstein, Simmental and Their Crosses / E. Samkova, J. Cítek, M. Brzáková [et al.] // Animals. — 2021. — Vol. 11. — P. 3284. — DOI: 10.3390/ani11113284.
7. Asadollahpour Nanaei H. Effect of LEPR, ABCG2 and SCD1 Gene Polymorphisms on Reproductive Traits in the Iranian Holstein Cattle / H. Asadollahpour Nanaei, S. Ansari Mahyari, M.-A. Edriss // Reproduction in Domestic Animals. — 2014. — № 49. — P. 769–774.
8. Littlejohn M.D. Expression Variants of the Lipogenic AGPAT6 Gene Affect Diverse Milk Composition Phenotypes in Bos Taurus / M.D. Littlejohn, K. Tiplady, T. Lopdell [et al.] // PLoS ONE. — № 9(1). — e85757 p. — DOI: 10.1371/journal.pone.0085757.
9. Зарипов О.Г. Изменчивость признаков молочной продуктивности у коров с разными генотипами каппа-казеина / О.Г. Зарипов // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. — 2008. — Т. 193. — 100 с.
10. Корнелаева М.В. Влияние генотипа по гену CSN2 на качественные и количественные характеристики молока коров голштинской породы / М.В. Корнелаева, Г.Г. Карликова, А.А. Сермягин // Journal of Agriculture and Environment. — 2024. — № 8 (48). — DOI: 10.60797/JAE.2024.48.2.
11. Погребняк В.А. Сравнительная характеристика молока голштинской породы разных генотипов по β- и κ-казеину / В.А. Погребняк, П.А. Захарский // Молочное и мясное скотоводство. — 2019. — № 3. — С. 17–20.
12. Зарипов О.Г. Способ проведения ПЦР с аллель-специфичными зондами для генотипирования крупного рогатого скота по аллелям А и В гена каппа-казеина: пат. 2791519 РФ; МПК51 C12Q 1/68 / О.Г. Зарипов; заявитель и патентообладатель ООО «Плем-Анализ». — № 2021132788; заявл. 2021-11-11; опубл. 2023-03-09. — 9 с.
13. Magna I. TaqMan allelic discrimination assay for A1 and A2 alleles of the bovine CSN2 gene / I. Magna, J. Dvorak // Czech Journal of Animal Science. — 2010. — № 55(8). — P. 307–312.
14. Kovalchuk S.N. Development of taqman PCR assay for genotyping SNP rs211250281 of the bovine AGPAT6 gene / Kovalchuk S.N., Arkhipova A.L. // Animal Biotechnology. — 2022. — P. 1–6.
15. Ковальчук С.Н. Способ генотипирования крупного рогатого скота по аллелям 878 СТ гена SCD1 (rs41255693) методом ПЦР в режиме реального времени: пат. 2744174 РФ; МПК51 C12N 1/00 / С.Н. Ковальчук; заявитель и

- патентообладатель Федеральний исследовательский центр животноводства имени академика Л.К. Эрнста». — № 2020114449; заявл. 2020-04-13; опублик. 2021-03-03. Бюл. №7. — 8 с.
16. Jiang Z. Significant associations of stearoyl-CoA desaturase (SCD1) gene with fat deposition and composition in skeletal muscle / Z. Jiang, J. J. Michal, D. J. Tobey, T. F. Daniels [et al.] // *International Journal of Biological Sciences*. — 2008. — 4. — P. 345–351.
 17. Li C. A post-GWAS confirming the SCD gene associated with milk medium- and long-chain unsaturated fatty acids in Chinese Holstein population / C. Li, D. Sun, S. Zhang [et al.] // *Animal Genetics*. — 2016. — № 47. — P. 483–490.
 18. Kulig H. SCD1 polymorphism and breeding value for milk production traits in cows / H. Kulig, K. Żukowski, I. Kowalewska-Luczak, P. Łakomy // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. — 2016. — № 22. — P. 131–134.
 19. Čítek J. Gene polymorphisms influencing yield, composition and technological properties of milk from Czech Simmental and Holstein cows / J. Čítek, M. Brzáková, L. Hanusová [et al.] // *Animal Bioscience*. — 2021. — Vol. 34(1). — P. 2–11.
 20. Carvajal A.M. Milk fatty acid profile is modulated by DGAT1 and SCD1 genotypes in dairy cattle on pasture and strategic supplementation / A.M. Carvajal, P. Huirican, J.M. Dezamour // *Genetics and Molecular Research*. — 2015. — Vol.15(2). — 7057 p. — DOI: 10.4238/gmr.15027057.
 21. Barton L. The polymorphisms of stearoyl-CoA desaturase (SCD1) and sterol regulatory element binding protein-1 (SREBP-1) genes and their association with the fatty acid profile of muscle and subcutaneous fat in Fleckvieh bulls / L. Barton, T. Kott, D. Bureš [et al.] // *Meat Science*. — 2010. — № 85. — P. 15–20.
 22. German J.B. A reappraisal of the impact of dairy foods and milk fat on cardiovascular disease risk / J.B. German, R.A. Gibson, R.M. Krauss [et al.] // *European Journal of Nutrition*. — 2009. — Vol. 48(4). — P. 191–203. — DOI 10.1007/s00394-009-0002-5.
 23. Schennink A. Milk Fatty Acid Unsaturation: Genetic Parameters and Effects of Stearoyl-CoA Desaturase (SCD1) and Acyl CoA: Diacylglycerol Acyltransferase 1 (DGAT1) / A. Schennink, J.M.L. Heck, H. Bovenhuis [et al.] // *Journal Of Dairy Science*. — 2008. — Vol. 91. — P. 2135–2143.
 24. Kesek-Wozniak M.M. Impact of SNPs in ACACA, SCD1, and DGAT1 Genes on Fatty Acid Profile in Bovine Milk with Regard to Lactation Phases / M.M. Kesek-Wozniak, E. Wojtas, A.E. Zielak-Steciwo // *Animals*. — 2020. — № 10. — P. 997.
 25. Li X. Association of polymorphisms at DGAT1, lep-tin, SCD1, CAPN1 and CAST genes with color, marbling and water holding capacity in meat from beef cattle populations in Sweden / X. Li., M. Ekerljung, K. Lundstrom [et al.] // *Meat Science*. — 2013. — Vol. 94. — P. 153–158.
 26. Aviles C. Associations between DGAT1, FABP4, LEP, RORC, and SCD1 gene polymorphisms and fat deposition in Spanish commercial beef / C. Aviles, O. Polvillo, F. Pena [et al.] // *Journal of Animal Science*. — 2013. — Vol. 91. — P. 4571–4577.
 27. Сафина Н.Ю. Мониторинг полиморфных вариантов гена Стеарил-КОА десатуразы (SCD1) крупного рогатого скота в зависимости от направления продуктивности / Н.Ю. Сафина, Ю.Р. Юльметьева, Ш.К. Шакиров [и др.] // *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. — 2018. — Т. 233. — № 1. — С. 136–140.
 28. Зарипов О.Г. Влияние полиморфизмов генов SCD1 (стерол-КоА десатураза) и AGPAT6 (1-ацилглицерин-3-фосфат-О-ацилтрансфераза) на содержание и жирнокислотный состав молочного жира у коров голштинизированной черно-пестрой породы / О.Г. Зарипов // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2023. — № 11 (137). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.148.
 29. Позовникова М.В. Связь полиморфных вариантов гена Стеароил-КоА-Десатураза (SCD1) с хозяйственно ценными признаками в российской популяции коров айширской породы / М.В. Позовникова, Г.Н. Сердюк, О.В. Тулинова [и др.] // *Сельскохозяйственная биология*. — 2017. — Т. 52. — № 6. — С. 1139–1147.
 30. Xiao-ya M. Novel Insight into the Potential Role of Acyl-glycerophosphate Acyltransferases Family Members on Triacylglycerols Synthesis in Buffalo / M. Xiao-ya, D. An-qin, L. Xing-rong [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2022. — № 23. — P. 6561.
 31. Bursakov S.A. Functional analysis of the GPAT4 gene mutation predicted to affect splicing / S.A. Bursakov, A.V. Kovaleva, A.V. Brigida [et al.] // *Animal Biotechnology*. — 2023. — DOI: 10.1080/10495398.2023.2269210.
 32. Raies M. Impact of Milk Derived β -Casomorphins on Physiological Functions and Trends in Research: A Review. / M. Raies, M. Kapila, R. Shandilya [et al.] // *International Journal of Food Properties*. — 2014. — Vol. 17. — № 8. — P.726–1741.
 33. Зырянова А.А. Генетическая структура симментальского скота по гену каппа-казеина и её влияние на молочную продуктивность / А.А. Зырянова, М.Ю. Севостьянов, О.А. Шевкунов // *Вестник Курганской ГСХА*. — 2022. — №1(41). — С. 26–31.
 34. Vallas M. Composite β -casein genotypes and their effect on composition and coagulation of milk from Estonian Holstein cows / M. Vallas, T. Kaart, S. Varv [et al.] // *Journal Of Dairy Science*. — 2012. — Vol. 95. — № 11. — P. 6760–6769.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bobe G. Short Communication: estimates of genetic variation of milk fatty acids in US Holstein cows / G. Bobe, J.A. Minick-Bormann, G.L. Lindberg [et al.] // *Journal Of Dairy Science*. — 2008. — Vol. 91. — P. 1209–13. — URL: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0252> (accessed: 19.08.2024).
2. Zaripov O.G. Genotipirovanie крупного рогатого скота по генам beta-лактоглобулина и каппа-казеина методами днк-технологии [Genotyping of cattle for the genes of beta-lactoglobulin and kappa-casein using DNA technology] : дис. ... of PhD

in Biology: 03.01.04 : defense of the thesis 2010-03-25 : approved 2010-04-20 / O.G. Zaripov. — Kazan, 2004. — 130 p. [in Russian]

3. Gorelik O.V. Fiziko-himicheskie pokazateli i tehnologicheskie svojstva moloka korov v zavisimosti ot linejnogo proishozhdenija [Physico-chemical parameters and technological properties of cow's milk depending on linear origin] / O.V. Gorelik, A.S. Gorelik, N.A. Fedoseeva [et al.] // *Agrarian Science*. — 2023. — № 372(7). — P. 53–57.

4. Akhmetov T.M. Sostav moloka i ego fiziko-himicheskie pokazateli u korov s raznymi genotipami kappa-kazeina [Milk composition and its physico-chemical parameters in cows with different kappa-casein genotypes] / T.M. Akhmetov, S.V. Tyulkin, O.G. Zaripov [et al.] // *Uchenye zapiski Kazanskoj gosudarstvennoj akademii veterinarnoj mediciny im. N.Je. Baumana* [Scientific notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N.E. Bauman]. — 2009. — Vol. 196. — 49 p. [in Russian]

5. Pogrebnyak V.A. Primenenie rezul'tatov diagnostiki geneticheskogo polimorfizma β - i κ -kazeinov [Application of the results of diagnosis of genetic polymorphism of β - and κ -caseins] / V.A. Pogrebnyak, A.V. Kolbas, N.A. Morkovkina // *Molochnoe i mjasnoe skotovodstvo* [Dairy and meat cattle breeding]. — 2019. — № 5. — P. 18–22. [in Russian]

6. Samkova E. Associations among Farm, Breed, Lactation Stage and Parity, Gene Polymorphisms and the Fatty Acid Profile of Milk from Holstein, Simmental and Their Crosses / E. Samkova, J. Čítek, M. Brzáková [et al.] // *Animals*. — 2021. — Vol. 11. — P. 3284. — DOI: 10.3390/ani11113284.

7. Asadollahpour Nanaei H. Effect of LEPR, ABCG2 and SCD1 Gene Polymorphisms on Reproductive Traits in the Iranian Holstein Cattle / H.Asadollahpour Nanaei, S. Ansari Mahyari, M.-A. Edriss // *Reproduction in Domestic Animals*. — 2014. — № 49. — P. 769–774.

8. Littlejohn M.D. Expression Variants of the Lipogenic AGPAT6 Gene Affect Diverse Milk Composition Phenotypes in Bos Taurus / M.D. Littlejohn, K. Tiplady, T. Lopdell [et al.] // *PLoS ONE*. — № 9(1). — e85757 p. — DOI: 10.1371/journal.pone.0085757.

9. Zaripov O.G. Izmenchivost' priznakov molochnoj produktivnosti u korov s raznymi genotipami kappa-kazeina [Variability of signs of milk productivity in cows with different genotypes of kappa-casein] / O.G. Zaripov // *Uchenye zapiski Kazanskoj gosudarstvennoj akademii veterinarnoj mediciny im. N.Je. Baumana* [Scientific notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N.E. Bauman]. — 2008. — Vol. 193. — 100 p. [in Russian]

10. Kornelaeva M.V. Vlijanie genotipa po genu CSN2 na kachestvennye i kolichestvennye harakteristiki moloka korov golshtinskoj porody [Influence of CSN2 genotype on qualitative and quantitative characteristics of Holstein cows' milk] / M.V. Kornelaeva, G.G. Karlikova, A.A. Sermyagin // *Journal of Agriculture and Environment*. — 2024. — №8 (48). — DOI: 10.60797/JAE.2024.48.2. [in Russian]

11. Pogrebnyak V.A. Pogrebnyak V.A. Sravnitel'naja harakteristika moloka golshtinskoj porody raznyh genotipov po β - i κ -kazeinu [Comparative characteristics of milk of the Holstein breed of different genotypes according to β - and κ -casein] / V.A. Pogrebnyak, P.A. Zazharsky // *Molochnoe i mjasnoe skotovodstvo* [Dairy and meat cattle breeding]. — 2019. — № 3. — P. 17–20. [in Russian]

12. Zaripov O.G. Sposob provedenija PCR s allel'-specifichnymi zondami dlja genotipirovanija krupnogo rogatogo skota po alleljam A i V gena kappa-kazeina [Method for PCR with allele-specific process for genotyping cattle by allele A and B of the kappa-casein gene]: pat. 2791519 RF: MPK51 C12Q 1/68 / O.G. Zaripov; the applicant and the patentee LLC "Plem-Analiz". — № 2021132788; appl. 2021-11-11; publ. 2023-03-09. — 9 c. [in Russian]

13. Magna I. TaqMan allelic discrimination assay for A1 and A2 alleles of the bovine CSN2 gene / I. Magna, J. Dvorak // *Czech Journal of Animal Science*. — 2010. — № 55(8). — P. 307–312.

14. Kovalchuk S.N. Development of taqman PCR assay for genotyping SNP rs211250281 of the bovine AGPAT6 gene / Kovalchuk S.N., Arkhipova A.L. // *Animal Biotechnology*. — 2022. — P. 1–6.

15. Kovalchuk S.N. Sposob genotipirovanija krupnogo rogatogo skota po alleljam 878 ST gena SCD1 (rs41255693) metodom PCR v rezhime real'nogo vremeni [Method for cattle genotyping by alleles 878 of SCD1 (RS41255693) gene by PCR in realtime]: pat. 2744174 РФ: MPK51 C12N 1/00 / S.N. Kovalchuk; the applicant and the patentee Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst. — № 2021132788; appl. 2020-04-13; publ. 2021-03-03. Bul. №7. — 8 p. [in Russian]

16. Jiang Z. Significant associations of stearoyl-CoA desaturase (SCD1) gene with fat deposition and composition in skeletal muscle / Z. Jiang, J. J. Michal, D. J. Tobey, T. F. Daniels [et al.] // *International Journal of Biological Sciences*. — 2008. — 4. — P. 345–351.

17. Li C. A post-GWAS confirming the SCD gene associated with milk medium- and long-chain unsaturated fatty acids in Chinese Holstein population / C. Li, D. Sun, S. Zhang [et al.] // *Animal Genetics*. — 2016. — № 47. — P. 483–490.

18. Kulig H. SCD1 polymorphism and breeding value for milk production traits in cows / H. Kulig, K. Żukowski, I. Kowalewska-Łuczak, P. Łakomy // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. — 2016. — № 22. — P. 131–134.

19. Čítek J. Gene polymorphisms influencing yield, composition and technological properties of milk from Czech Simmental and Holstein cows / J. Čítek, M. Brzáková, L. Hanusová [et al.] // *Animal Bioscience*. — 2021. — Vol. 34(1). — P. 2–11.

20. Carvajal A.M. Milk fatty acid profile is modulated by DGAT1 and SCD1 genotypes in dairy cattle on pasture and strategic supplementation / A.M. Carvajal, P. Huirican, J.M. Dezamour // *Genetics and Molecular Research*. — 2015. — Vol.15(2). — 7057 p. — DOI: 10.4238/gmr.15027057.

21. Barton L. The polymorphisms of stearoyl-CoA desaturase (SCD1) and sterol regulatory element binding protein-1 (SREBP-1) genes and their association with the fatty acid profile of muscle and subcutaneous fat in Fleckvieh bulls / L. Barton, T. Kott, D. Bureš [et al.] // *Meat Science*. — 2010. — № 85. — P. 15–20.

22. German J.B. A reappraisal of the impact of dairy foods and milk fat on cardiovascular disease risk / J.B. German, R.A. Gibson, R.M. Krauss [et al.] // *European Journal of Nutrition*. — 2009. — Vol. 48(4). — P. 191–203. — DOI 10.1007/s00394-009-0002-5.
23. Schennink A. Milk Fatty Acid Unsaturation: Genetic Parameters and Effects of Stearoyl-CoA Desaturase (SCD1) and Acyl CoA: Diacylglycerol Acyltransferase 1 (DGAT1) / A. Schennink, J.M.L. Heck, H. Bovenhuis [et al.] // *Journal Of Dairy Science*. — 2008. — Vol. 91. — P. 2135–2143.
24. Kesek-Wozniak M.M. Impact of SNPs in ACACA, SCD1, and DGAT1 Genes on Fatty Acid Profile in Bovine Milk with Regard to Lactation Phases / M.M. Kesek-Wozniak, E. Wojtas, A.E. Zielak-Steciwo // *Animals*. — 2020. — № 10. — P. 997.
25. Li X. Association of polymorphisms at DGAT1, lep-tin, SCD1, CAPN1 and CAST genes with color, marbling and water holding capacity in meat from beef cattle populations in Sweden / X. Li., M. Ekerljung, K. Lundstrom [et al.] // *Meat Science*. — 2013. — Vol. 94. — P. 153–158.
26. Aviles C. Associations between DGAT1, FABP4, LEP, RORC, and SCD1 gene polymorphisms and fat deposition in Spanish commercial beef / C. Aviles, O. Polvillo, F. Pena [et al.] // *Journal of Animal Science*. — 2013. — Vol. 91. — P. 4571–4577.
27. Safina N.Yu. Monitoring polimorfnyh variantov ge-na Stearil-KOA desaturazy (SCD1) krupnogo rogatogo skota v zavisimosti ot napravlenija produktivnosti [Monitoring of polymorphic variants of the Stearicoa desaturase (SCD1) gene in cattle depending on the direction of productivity] / N.Yu. Safina, Yu.R. Yulmetyeva, Sh.K. Shakirov [et al.] // *Uchenye zapiski Kazanskoj gosudarstvennoj akademii veterinarnoj mediciny im. N.Je. Baumana* [Scientific notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N.E. Bauman]. — 2018. — Vol. 233. — № 1. — P. 136–140. [in Russian]
28. Zaripov O.G. Vlijanie polimorfizmov genov SCD1 (sterol-KoA desaturaza) i AGPAT6 (1-acilglicerin-3-fosfat-O-aciltransferaza) na sodержanie i zhirkislotnyj sostav molochnogo zhira u korov golstinizirovannoj cherno-pestroj porody [Influence of scd1 (sterol-coa desaturase) and agpat6 (1-acylglycerol-3-phosphate-o-acyltransferase) genes polymorphisms on content and fat composition of milk fat in golstinated black-and-white cows] / O.G. Zaripov // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. — 2023. — № 11 (137). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.148. [in Russian]
29. Pozovnikova M.V. Svjaz' polimorfnyh variantov gena Stearoil-KoA-Desaturaza (SCD1) s hozjajstvenno cennymi priznakami v rossijskoj populjacii korov ajshirskoj porody [The relationship of polymorphic variants of the Stearoyl-CoA-Desaturase (SCD1) gene with economically valuable traits in the Russian population of Ayshir cows] / M.V. Pozovnikova, G.N. Serdyuk, O.V. Tulinova [et al.] // *Sel'skohozjajstvennaja biologija* [Agricultural Biology]. — 2017. — Vol. 52. — № 6. — P. 1139–1147. [in Russian]
30. Xiao-ya M. Novel Insight into the Potential Role of Acyl-glycerophosphate Acyltransferases Family Members on Triacylglycerols Synthesis in Buffalo / M. Xiao-ya, D. An-qin, L. Xing-rong [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2022. — № 23. — P. 6561.
31. Bursakov S.A. Functional analysis of the GPAT4 gene mutation predicted to affect splicing / S.A. Bursakov, A.V. Kovaleva, A.V. Brigida [et al.] // *Animal Biotechnology*. — 2023. — DOI: 10.1080/10495398.2023.2269210.
32. Raies M. Impact of Milk Derived β -Casomorphins on Physiological Functions and Trends in Research: A Review. / M. Raies, M. Kapila, R. Shandilya [et al.] // *International Journal of Food Properties*. — 2014. — Vol. 17. — № 8. — P.726–1741.
33. Zyryanova A.A. Geneticheskaja struktura simmental'skogo skota p genu kappa-kazeina i ejo vlijanie na molochnuju produktivnost' [The genetic structure of Simmental cattle with the kappa-casein gene and its effect on dairy productivity] / A.A. Zyryanova, M.Yu. Sevostyanov, O.A. Shevkunov // *Vestnik Kurganskoj GSHA* [Bulletin of the Kurgan Agricultural Academy]. — 2022. — №1(41). — P. 26–31. [in Russian]
34. Vallas M. Composite β - κ -casein genotypes and their effect on composition and coagulation of milk from Estonian Holstein cows / M. Vallas, T. Kaart, S. Varv [et al.] // *Journal Of Dairy Science*. — 2012.— Vol. 95. — № 11. — P. 6760–6769.