

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1>

УЛУЧШЕНИЕ ОЦЕНКИ МАЛОЗНАЧИМЫХ ЭФФЕКТОВ В МОДЕЛЯХ BLUP С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Научная статья

Зарипов О.Г.^{1,*}, Отраднов П.И.²

¹ORCID : 0000-0001-7493-4410;

²ORCID : 0000-0002-1153-5815;

^{1,2}Федеральный исследовательский центр животноводства имени Л.К. Эрнста, Подольск, Российская Федерация

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

Аннотация

В статье представлены результаты анализа применения категориальных переменных со вложенными факторами в модели смешанного типа для оценки племенной ценности животных. Использование вложенных факторов позволяет достоверно оценивать влияние включенных в модель факторов и, как следствие, племенную ценность животных. Также этот подход позволяет более детально описывать влияние уровней иерархически обусловленных факторов. Оценка племенной ценности животного при использовании моделей со вложенными факторами не отличается между моделями, что показывает нам коэффициент корреляции ($r=0,97$) между оценками и диапазон достоверности оценки каждого животного, что позволяет проводить корректный отбор животных.

Ключевые слова: оценка племенной ценности, вложенный фактор, BLUP animal model, генотип, модель смешанного типа.

IMPROVING THE ESTIMATION OF LOW SIGNIFICANCE EFFECTS IN BLUP MODELS USING
HIERARCHICAL STRUCTURES

Research article

Zaripov O.G.^{1,*}, Otradnov P.I.²

¹ORCID : 0000-0001-7493-4410;

²ORCID : 0000-0002-1153-5815;

^{1,2}Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Podolsk, Russian Federation

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

Abstract

The article presents the results of analysing the application of categorical variables with embedded factors in a mixed model for estimating the breeding value of animals. The use of embedded factors makes it possible to reliably evaluate the influence of the factors included in the model and, consequently, the breeding value of animals. Also, this approach allows for a more detailed description of the influence of levels of hierarchically determined factors. The assessment of the breeding value of an animal when using models with embedded factors does not differ between models, which shows us the correlation coefficient ($r=0.97$) between the assessments and the range of reliability of the assessment of each animal, which allows to carry out a correct selection of animals.

Keywords: breeding value assessment, embedded factor, BLUP animal model, genotype, mixed type model.

Введение

Применение уравнений смешанных моделей при оценке продуктивных качеств животных позволяет не только получить значения племенной ценности (EBV) животного, но и оценку каждого фактора, входящего в уравнение. Во многих исследованиях при проведении оценки влияния различных факторов – от генетических до средовых – преимущественно они представлены как категориальные переменные. Факторы, учитываемые в таких уравнениях, обычно оцениваются как классификационные эффекты, т.е. каждый фактор проявляется в более чем одном уровне. Отсутствие компоненты взаимодействия в статистической модели приводит к независимой оценке каждого фактора. В зависимости от целей и задач исследований подобный подход видится уместным, однако зачастую ведет к недооценке влияния малозначимых переменных. Решение данного вопроса возможно через применение иерархических моделей со вложенными (nested) факторами, статистически значимо влияющими на изменчивость признака в пределах фактора более высокого уровня. Такой подход позволяет оценивать каждый из них с учётом взаимодействия, а также использовать базы данных со множествами градаций средовых факторов. Во многих исследованиях к категориальным факторам относят неколичественные эффекты, такие как номер лактации, эффект группы содержания (стадо, ферма и т.п.), дату отела, а также генотип животного по какому-либо гену. Включение последнего в уравнение смешанных моделей позволяет оценивать его влияние на продуктивные качества, как отклонение от популяционной константы (среднего значения) с учётом влияния средовых эффектов, а не простым сравнением средних в популяции [1], [2], [3].


Использование иерархических уравнений смешанных моделей со вложенными случайными эффектами позволит проводить оценку факторов, используемых в линейных моделях, в зависимости от уровня влияния и иерархической структуры взаимосвязи между факторами, что даст более точную оценку влияния каждого фактора на изучаемый признак и, как следствие, более точную оценку племенной ценности. В связи с этим целью нашей работы заключалась в


определении точности оценки при использовании иерархических моделей смешанного типа со вложенными эффектами по сравнению с моделями с эффектами, оцениваемыми независимо, на примере изменчивости показателей продуктивности и жирнокислотного состава молока.

Методы и принципы исследования

Для исследования использовалась база данных, составленная и примененная в предыдущих исследованиях [4].

Оценка влияния категориальных факторов на исследуемые признаки проводилась при помощи математических моделей смешанного типа, составленных в рамках методологии BLUP Animal Model. Расчёты осуществлялись в программах семейства BLUPF90 [5]. Модель оценки имела следующий вид:

Модель 1: 

Модель 2: 

где y_{ijklm}/y_{ijk} – оцениваемый показатель продуктивности или жирнокислотного состава молока;

μ – популяционная константа;

L_i – фиксированный эффект i -й лактации;

β – коэффициент линейной регрессии;

DIM_j – количество дойных дней;

$Season_k$ – сезон лактации, в который был произведен отбор образца молока (Зима-весна-лето-осень);

G_l – фиксированный эффект каждого генотипа;

Lg_i – фиксированный вложенный эффект «лактация-генотип»;

$animal_m$ – рандомизированный эффект m -ой коровы ($n=10243$ наблюдения) имеющий нормальное распределение со средней, равной 0, и дисперсией, равной σ_a^2 ($Var_a \sim 0, \sigma_a^2$);

e_{ijklm} – эффект остатков модели.

Фактор Lg формировался посредством градации каждой лактации на каждый генотип гена AGPAT6.

Достоверность племенной ценности рассчитывалась по формуле:

$$Rel = \frac{Var_a}{Var_a + \frac{\sigma_e^2}{n}}$$

Где, Rel – достоверность, $s.e.$ – стандартная ошибка, Var_a – генетическая дисперсия.

Для расчета наследуемости (h^2) использовали отношение генетической дисперсии (Var_a) к сумме генетической и остаточной (σ_e^2) дисперсий:

$$h^2 = \frac{Var_a}{Var_a + \sigma_e^2}$$

Основные результаты

Применение математических моделей смешанного типа в рамках методологии BLUP с вычислительными возможностями современных программ позволяет проводить одновременный анализ множества факторов, влияющих на продуктивные характеристики оцениваемых объектов. В качестве факторов, влияние которых на исследуемый признак оценивается, могут выступать любые переменные, взаимосвязанные с изменчивостью количественного признака. В животноводстве зачастую используют такие переменные в модели как «стадо» либо «ферма» или «хозяйство», которое по своей сути отражает условия содержания и кормления животного, «год» и «сезон отела» характеризующие условия начала лактации. В случае если исходная база фенотипических данных собирается на основании контрольных доек за период времени, то возможно применить такую переменную, как «сезон лактации» [4] и также можно в виде фактора ввести такие переменные, как «стадия лактации» и «номер лактации» [6]. Методология применения факторов в математических моделях также позволяет проводить анализ влияния генотипов однонуклеотидных полиморфизмов генов-маркеров хозяйственно-полезных признаков или кандидатов в них, не ограничиваясь только сравнением средних по популяции, а имея в результате поправку величины признака от популяционного среднего [7], [8]. Являясь по сути градацией уровней, фиксированные факторы между собой возможно объединить в новую градацию т.е. вложенный (nested) фактор, когда каждый фактор проявляет себя только в рамках иного фактора и тем самым они объясняют разные составляющие изменчивости, не демонстрируя линейной зависимости. Единственный момент, не допускающий использование таких факторов в моделях – это применение их, как дополнительных переменных в модели, уже учитывающей их по отдельности. Использование в модели вложенных фиксированных факторов позволяет расширить уровни градации факторов и, соответственно, диапазон их оценки.

Для корректного сравнения возможности использования вложенных факторов в моделях смешанного типа нами были составлены две модели, включавшие в себя один набор факторов, но в одной из моделей эффект «номера лактации» и эффект «генотипа» (ген AGPAT6) были объединены в единый фактор Lg_i – фиксированный эффект «лактация-генотип».

Анализ смешанных моделей, реализованный в библиотеке lme4 языка программирования R, позволил получить коэффициенты детерминации (табл.1) для обеих моделей, показывающий насколько составленные модели описывают исследуемый признак.

Таблица 1 - Коэффициенты детерминации

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.1>

Признак	R ² модель 1	R ² модель 2
МДЖ%	0,495	0,446

МДБ%	N/A	0,675
Казеин	0,681	0,685
Миристиновая (C14:0)	0,723	0,689
Пальмитиновая (C16:0)	0,548	0,512
Стеариновая (C18:0)	0,247	0,236
Олеиновая (C18:1)	0,2	0,197
Длинноцепочечные (LCFA)	0,195	0,189
Среднецепочечные (MCFA)	0,636	0,6
Мононенасыщенные (MUFA)	0,2	0,189
Полиненасыщенные (PUFA)	N/A	0,312
Насыщенные (SFA)	0,505	0,482
Короткоцепочечные (SCFA)	0,478	0,466
Трансизомеры (TFA)	0,306	0,294

Полученные значения коэффициентов детерминации варьировались от 0,2 до 0,72 в зависимости от признака. Так, минимальные коэффициенты были получены для длинноцепочечных ненасыщенных жирных кислот, тогда как максимальные характеризовали описание моделью изменчивости насыщенных среднецепочечных жирных кислот и массовой доли жира и белка. Это согласуется с данными о влиянии учтённых факторов на исследуемые признаки [9], [10]. Для ряда признаков использование большого количества факторов, представленных категориальными переменными, может приводить к возникновению линейной зависимости между ними, ведущей к невозможности их оценки, отражающейся в некорректном расчете коэффициента детерминации (N/A). Применение фиксированных факторов, выраженных вложенными переменными, позволяет избежать ситуаций линейной зависимости факторов, являющихся составной частью переменной, сводя описание разнообразия признака, обусловленного ими, к эффекту их взаимодействия.

Достоверность категориальных факторов составляла $p < 0,001$, для всех переменных (Табл. 2), кроме фактора генотипа в модели 1, где достоверность его влияния статистически незначимой, при этом достоверность вложенного фактора L_g во второй модели составляла для стеариновой и олеиновой жирных кислот $p < 0,01$, для всех остальных факторов $p < 0,001$. Таким образом, использование вложенных факторов позволяет рассматривать факторы, малозначимые по отдельности, в рамках их влияния внутри более значимого, как за счет увеличения количества градаций факторов, так и за счёт снижения внутригрупповых различий при сохранении или увеличении межгрупповых.

Таблица 2 - Уровень достоверности категориальных факторов обеих моделей оценки

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.2>

P-value	L_g	Season _k	Animal _m	L_i	G_i
МДЖ%	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	5,404e-15	0,1902
МДБ%	4,45e-13	<2,20e-16	<2,20e-16	7,769e-08	0,9999
Казеин	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	4,165e-10	1
C14:0	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	0,9327
C16:0	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	0,1245
C18:0	0,002752	<2,20e-16	<2,20e-16	0,001029	0,306399
C18:1	0,004667	<2,20e-16	<2,20e-16	0,0009189	0,8618825
LCFA	2,96e-05	<2,20e-16	<2,20e-16	6,004e-06	0,539
MCFA	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	<2,20e-16	0,3514
MUFA	1,93e-05	<2,20e-16	<2,20e-16	0,0002978	0,7479924
PUFA	2,98e-11	<2,20e-16	<2,20e-16	9,478e-15	0,9999
SFA	1,19e-14	<2,20e-16	<2,20e-16	8,574e-10	0,1672
SCFA	4,78e-08	<2,20e-16	<2,20e-16	5,677e-05	0,3783
TFA	5,76e-05	<2,20e-16	<2,20e-16	2,724e-06	1

Данное утверждение также подтверждается тем, что доля дисперсии факторов в общей дисперсии признаков, отличалась в зависимости от модели оценки признака (Табл.3). При этом доля дисперсии вложенных факторов составляла примерно среднее значение долей дисперсии объединенных факторов.

Таблица 3 - Доля дисперсии вложенных и отдельных факторов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.3>

	L _g (Модель 2)	L _i (Модель 1)	G ₁ (Модель 1)
МДЖ, %	6,17	12,82	0,7
МДБ, %	2,02	1,3	0,00
Казеин, %	2,52	1,62	0,00
С14:0, %	13,03	20,53	0,05
С16:0, %	5,56	10,49	1,18
С18:0, %	1,02	1,84	0,38
С18:1, %	0,9	2,08	0,04
LCFA, %	1,49	1,86	0,14
MCFA, %	7,78	14,44	0,65
MUFA, %	1,86	3,23	0,08
PUFA, %	3,91	6,38	0,00
SFA, %	3,39	6,66	0,81
SCFA, %	2,19	4,38	0,38
TFA, %	1,56	2,45	0,00

Наследуемость каждого признака при расчете его оценки обеими моделями не демонстрировала существенных различий и соответствовала результатам, полученным нами в предыдущих исследованиях [4].

Построение математических моделей смешанного типа и последующее их применение в рамках методологии BLUP в первую очередь предназначено для оценки племенной ценности животного (EBV) по исследуемому признаку. Особенно важна достоверность получаемых оценок. Анализ этого параметра в нашем исследовании представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Достоверность EBV обеих моделей

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.4>

	Модель 1	Модель 2
МДЖ, %	62,0-96,3	51,0-96,1
МДБ, %	71,9-97,4	62,4-97,5
Казеин, %	72,9-97,5	63,2-97,5
С14:0, %	83,0-98,3	72,9-98,2
С16:0, %	71,0-97,3	60,4-97,3
С18:0, %	46,1-93,6	38,6-93,5
С18:1, %	36,6-91,1	31,4-90,9
LCFA, %	35,1-90,5	30,0-90,3
MCFA, %	76,1-97,8	65,4-97,7
MUFA, %	35,4-90,6	30,0-90,3
PUFA, %	51,7-94,7	43,6-94,7%
SFA, %	64,7-96,6	54,4-96,6
SCFA, %	61,5-96,2	52,0-96,3
TFA, %	54,6-95,1	45,8-95,1

Примечание: мин.-макс. значения

Достоверность племенной ценности зависит в первую очередь от количества наблюдений для каждого животного в выборке и разнообразием признака. Как было показано ранее (табл.1), дисперсия признаков в обеих моделях практически не отличалась, но все-таки минимальные отличия присутствовали. Исходя из этого, можно судить, что у животных с меньшим числом наблюдений достоверность оценки племенной ценности демонстрировала минимальные значения, отличающиеся между моделями.

Также сравнивая оценки племенной ценности, стоит обратить внимание на ранжирование животных и на фактические значения оценок в обеих моделях. Коэффициент корреляции между массивами оценок составлял $r = 0,97$, что свидетельствует о возможности проводить корректный отбор животных при оценке их любой моделью.

В рамках нашего исследования, получив новую градацию вложенных факторов – Lg, представляющую собой комбинацию факторов «номер лактации» и «генотип гена липидного обмена AGPAT6», мы имеем возможность оценить влияние генотипов AGPAT6 на изменчивость исследуемого признака в рамках каждой из учтённых лактаций, в то время как при использовании каждого из эффектов по отдельности, полученные оценки характеризовали общее влияние факторов в представленной выборке. В данном примере использование вложенных эффектов актуально по той причине, что молочный жир и особенно состав жирных кислот имеют сложные пути синтеза и регуляции экспрессии липидного обмена, которые различаются не только по стадиям, но и зависят от возраста особи, выраженного в номере лактации [1], [11].

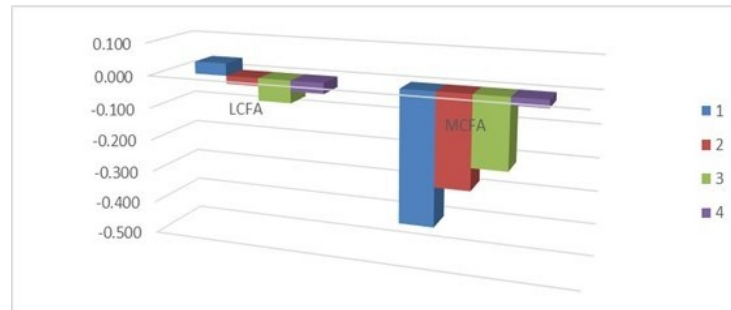


Рисунок 1 - Влияние номера лактации на содержание длинно- и среднецепочечных жирных кислот
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.5>

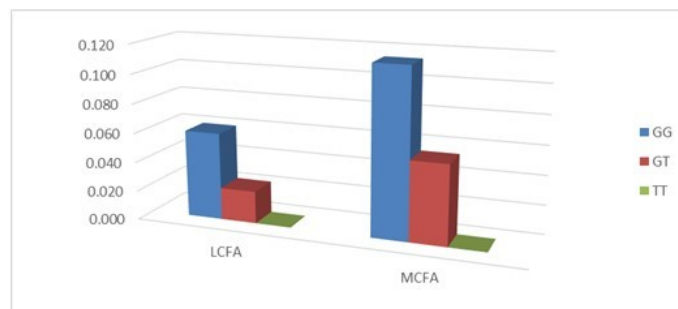


Рисунок 2 - Влияние генотипа AGPAT6 на содержание длинно- и среднецепочечных жирных кислот
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.6>

Так, при использовании модели 1, мы можем оценить влияние факторов на исследуемый признак в целом по выборке. Например, мы видим, что с ростом номера лактации увеличивается содержание среднецепочечных жирных кислот, и наоборот – снижение содержания длинноцепочечных (Рис.1), а также позитивное влияние аллель G гена AGPAT6 на содержание жирных кислот (Рис.2).

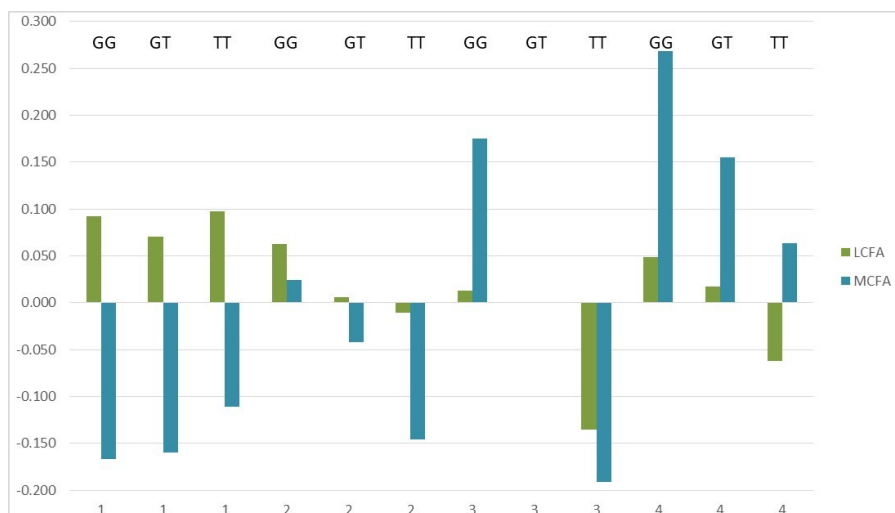


Рисунок 3 - Оценки влияния вложенного фактора Lg на содержание длинно- и среднецепочечных жирных кислот
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.50.1.7>

При использовании вложенного фактора (Рис. 3) видно, что чёткая дифференциация оценок от генотипа начинается со второй лактации, но в общей картине также повторяет тренд, полученный в модели 1, за исключением первой лактации. Полученные данные согласуются с ранее полученными результатами [12], а также более детально отражают процесс работы синтетаз жирных кислот у коров-первотелок и коров последующих лактаций [13].

Заключение

Оценив возможность применения вложенных факторов в моделях смешанного типа для оценки племенной ценности животных, а также влияния категориальных переменных, используемых в модели, можно констатировать, что получаемые результаты мало отличимы от данных, получаемых в ходе обычного анализа факторов. Не было выявлено существенного влияния объединения эффектов модели в один на итоговые оценки племенной ценности и параметры их достоверности. Однако такой подход позволяет проводить более детальный анализ влияния малозначимых факторов на изменчивость признака на популяционном уровне в рамках более значимых компонент изменчивости. Применение вложенных факторов позволяет получать достоверные результаты для подобных эффектов, в случае если их влияние на изменчивость исследуемого признака по отдельности недостоверно. Это происходит как за счет увеличения градаций факторов, так и разнообразия между этими градациями. Полученные результаты могут быть предпосылкой для апробации использования статистических моделей со вложенными факторами в оценке племенной ценности животных, а также применения более сложных иерархий факторов с тремя и более уровнями.

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. Park C.H. Genetic parameters for milk fatty acid composition of Holstein in Korea / C.H. Park, U. Ranaraja, C.G. Dang [et al.] // *Asian-Australas J Anim Sci.* — 2020. — Vol. 33 — P. 1573–1578.
2. Elzaki S. Effects of DGAT1 on milk performance in Sudanese Butana×Holstein crossbred cattle / S. Elzaki, P. Korkuč, D. Arends [et al.] // *Tropical Animal Health and Production.* — 2022. — Vol. 54. — P. 142. — DOI: 10.1007/s11250-022-03141-7.
3. Kulig H. SCD1 polymorphism and breeding value for milk production traits in cows / H. Kulig, K. Żukowski, I. Kowalewska-Luczaki [et al.] // *Bulg. J. Agric. Sci.* — 2016. — Vol. 22. — P. 131–134.
4. Зарипов О.Г. Влияние факторов среды и полиморфизма гена DGAT1 на изменчивость признаков молочной продуктивности и профиль жирных кислот молока голштинизированных черно-пестрых коров / О.Г. Зарипов, П.И. Отрадных, И.А. Лашнева [и др.] // *Journal of Agriculture and Environment.* — 2024. — № 1 (41). — DOI: 10.23649/JAE.2024.41.8.
5. Misztal I. BLUPF90 and related programs (BGF90) / I. Misztal, S. Tsuruta, T. Strabel [et al.] // *Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production Montpellier, Communication.* — 2002. — Vol. 28. — № 28-27. — P. 21–22.
6. Čitek J. Technological properties of cow's milk: correlations with milk composition, effect of interactions of genes and other factors / J. Čitek, M. Brzakova, L. Hanusova [et al.] // *Czech J. Anim. Sci.* — 2020. — Vol. 65. — P. 13–22.
7. He C. AGPAT6 polymorphism and its association with milk traits of dairy goats / C. He, C. Wang, Z.H. Chang [et al.] // *Genetics and Molecular Research.* — 2011. — Vol. 10 (4). — P. 2747–2756.
8. Raschia M.A. Single nucleotide polymorphisms in candidate genes associated with milk yield in Argentinean Holstein and Holstein x Jersey cows / M.A. Raschia, J.P. Nani, D.O. Maizon [et al.] // *Journal of Animal Science and Technology.* — 2018. — Vol. 60. — P. 31. — DOI: 10.1186/s40781-018-0189-1.
9. Chilliard Y. Adipose tissue metabolism and its role in adaptations to undernutrition in ruminants / Y. Chilliard, A. Ferlay, Y. Faulconnier [et al.] // *Proc Nutr Soc.* — 2000. — Vol. 59. — P. 127–134. — DOI: 10.1017/S002966510000015X.
10. Mansson H.L. Fatty acids in bovine milk fat / H.L. Mansson // *Food Nutr Res.* — 2008. — Vol. 52. — P. 1821. — DOI: 10.3402/fnr.v52i0.1821.
11. Samkova E. Joint effects of breed, parity, month of lactation, and cow individuality on the milk fatty acids composition / E. Samkova, J. Koubova, L. Hasonova [et al.] // *Mljekarstvo.* — 2018. — Vol. 68 (2). — P. 98–107. — DOI: 10.15567/mljekarstvo.2018.0203.
12. 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.

13. Miller N. Effect of stage of lactation and parity on mammary gland cell renewal / N. Miller, L. Delbecchi, D. Petitclerc [et al.] // *J Dairy Sci.* — 2006. — Vol. 89. — P. 4669–4677. — DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72517-6.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Park C.H. Genetic parameters for milk fatty acid composition of Holstein in Korea / C.H. Park, U. Ranaraja, C.G. Dang [et al.] // *Asian-Australas J Anim Sci.* — 2020. — Vol. 33 — P. 1573–1578.
2. Elzaki S. Effects of DGAT1 on milk performance in Sudanese Butana×Holstein crossbred cattle / S. Elzaki, P. Korkuć, D. Arends [et al.] // *Tropical Animal Health and Production.* — 2022. — Vol. 54. — P. 142. — DOI: 10.1007/s11250-022-03141-7.
3. Kulig H. SCD1 polymorphism and breeding value for milk production traits in cows / H. Kulig, K. Żukowski, I. Kowalewska-Luczaki [et al.] // *Bulg. J. Agric. Sci.* — 2016. — Vol. 22. — P. 131–134.
4. Zaripov O.G. Vliyanie faktorov sredy i polimorfizma gena DGAT1 na izmenchivost' priznakov molochnoj produktivnosti i profil' zhirnyh kislot moloka golshtinizirovannyh cherno-pestryh korov [Influence of environmental factors and DGAT1 gene polymorphism on variability of milk productivity traits and fatty acid profile of milk of Holsteinised black-breed cows] / O.G. Zaripov, P.I. Otradnov, I.A. Lashneva [et al.] // *Journal of Agriculture and Environment.* — 2024. — № 1 (41). — DOI: 10.23649/JAE.2024.41.8. [in Russian]
5. Misztal I. BLUPF90 and related programs (BGF90) / I. Misztal, S. Tsuruta, T. Strabel [et al.] // *Proceedings of the 7th world congress on genetics applied to livestock production Montpellier, Communication.* — 2002. — Vol. 28. — № 28-27. — P. 21–22.
6. Čitek J. Technological properties of cow's milk: correlations with milk composition, effect of interactions of genes and other factors / J. Čitek, M. Brzakova, L. Hanusova [et al.] // *Czech J. Anim. Sci.* — 2020. — Vol. 65. — P. 13–22.
7. He C. AGPAT6 polymorphism and its association with milk traits of dairy goats / C. He, C. Wang, Z.H. Chang [et al.] // *Genetics and Molecular Research.* — 2011. — Vol. 10 (4). — P. 2747–2756.
8. Raschia M.A. Single nucleotide polymorphisms in candidate genes associated with milk yield in Argentinean Holstein and Holstein x Jersey cows / M.A. Raschia, J.P. Nani, D.O. Maizon [et al.] // *Journal of Animal Science and Technology.* — 2018. — Vol. 60. — P. 31. — DOI: 10.1186/s40781-018-0189-1.
9. Chilliard Y. Adipose tissue metabolism and its role in adaptations to undernutrition in ruminants / Y. Chilliard, A. Ferlay, Y. Faulconnier [et al.] // *Proc Nutr Soc.* — 2000. — Vol. 59. — P. 127–134. — DOI: 10.1017/S002966510000015X.
10. Mansson H.L. Fatty acids in bovine milk fat / H.L. Mansson // *Food Nutr Res.* — 2008. — Vol. 52. — P. 1821. — DOI: 10.3402/fnr.v52i0.1821.
11. Samkova E. Joint effects of breed, parity, month of lactation, and cow individuality on the milk fatty acids composition / E. Samkova, J. Koubova, L. Hasonova [et al.] // *Mljekarstvo.* — 2018. — Vol. 68 (2). — P. 98–107. — DOI: 10.15567/mljekarstvo.2018.0203.
12. Zaripov O.G. Vliyanie polimorfizmov genov SCD1 (sterol-KoA desaturaza) i AGPAT6 (1-acilglicerin-3-fosfat-O-aciltransferaza) na sodержanie i zhirkislotnyj sostav molochnogo zhira u korov golshtinizirovannoj cherno-pestroj porody [Influence of polymorphisms of genes SCD1 (sterol-CoA desaturase) and AGPAT6 (1-acylglycerol-3-phosphate-O-acyltransferase) on the content and fatty acid composition of milk fat in Holsteinised black-breed cows] / O.G. Zaripov // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal].* — 2023. — № 11 (137). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.148. [in Russian]
13. Miller N. Effect of stage of lactation and parity on mammary gland cell renewal / N. Miller, L. Delbecchi, D. Petitclerc [et al.] // *J Dairy Sci.* — 2006. — Vol. 89. — P. 4669–4677. — DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72517-6.