

БИОЭЛЕМЕНТОЛОГИЯ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 636.082.11(470.23+470.12+470.56)

doi:10.33284/2658-3135-107-3-8

Связь полиморфизма гена *DGATI* с элементным составом биосубстратов и продуктивностью коров чёрно-пёстрой породы Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областей

Екатерина Ивановна Тарасова¹, Валентина Сергеевна Полякова², Елена Анатольевна Сизова³

¹²³Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹ekaterina45828@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6325-7389>

²valyapolyakova2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2739-0208>

³sizova.178@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Аннотация. В последние годы повышенный интерес к генетическим механизмам, влияющим на формирование элементного состава молока и крови коров, приводит к необходимости более глубокого изучения этой темы. Цель данного исследования заключалась в оценке влияния полиморфизма K232A гена *DGATI* на показатели элементного состава волос, сыворотки крови и молочной продуктивности коров чёрно-пёстрой породы трёх областей. Пробы были отобраны у молочных коров Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областей. Элементный состав анализировался по 25 элементам (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, Hg, Sr, V, Zn) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Генотипирование осуществлялось методом высокопроизводительного секвенирования, реализуемого при помощи секвенатора MiSeq (*Illumina*, США). Результаты показали, что у коров Вологодской области с генотипом AA в волосах содержание марганца было на 31,10 %, а в Ленинградской области – на 55,82 % выше по сравнению с животными с генотипом KK; концентрации железа превышали показатели данной группы на 136,17 % и 178,43 % ($p=0,02$) соответственно. В сыворотке крови у животных Вологодской области с генотипом KK были зафиксированы наиболее высокие концентрации никеля, на 60,81 % превышающие уровень у животных с генотипом AA, в Ленинградской области – на 37,88 %. У коров с генотипом KK в Вологодской области были отмечены более высокие показатели удоя, превышающие показатели генотипа AA на 25,99 % ($p=0,03$); в Ленинградской области генотип AA показывал на 49,14 % лучшие результаты по сравнению с KK, а в Оренбургской области – на 18,63 % в сравнении с АК. Проведённое исследование подтверждает значимость полиморфизма K232A гена *DGATI* для селекционных работ.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, чёрно-пёстрая порода, диацилглицерин-О-ацилтрансфераза, K232A, элементный состав, молочная продуктивность

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2022-2024 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (FNWZ-2022-0011).

Для цитирования: Тарасова Е.И., Полякова В.С., Сизова Е.А. Связь полиморфизма гена *DGATI* с элементным составом биосубстратов и продуктивностью коров чёрно-пёстрой породы Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областей // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 3. С. 8-24. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-3-8>

Original article

Association of *DGAT1* gene polymorphism with the elemental composition of biosubstrates and productivity of black-and-white cows in the Leningrad, Vologda, and Orenburg Regions

Ekaterina I Tarasova¹, Valentina S Polyakova², Elena A Sizova³

^{1,2,3}Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹ekaterina45828@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6325-7389>

²valyapolyakova2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2739-0208>

³sizova.178@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Abstract. In recent years, the increased interest in genetic mechanisms influencing the elemental composition of milk and blood in cows has led to the necessity for a deeper study of this topic. The aim of this research was to evaluate the impact of the K232A polymorphism of the *DGAT1* gene on the elemental composition of hair, blood serum, and milk productivity in Black-and-White cows from three regions. Samples were collected from dairy cows in the Leningrad, Vologda, and Orenburg regions. The elemental composition was analyzed for 25 elements (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, Hg, Sr, V, Zn) using inductively coupled plasma mass spectrometry. Genotyping was performed using high-throughput sequencing facilitated by the MiSeq sequencer (*Illumina*, USA). The results showed that in cows with the AA genotype from the Vologda region, the manganese content in the hair was 31.10% higher, and in the Leningrad region - 55.82% higher than in animals with the KK genotype; the iron concentration exceeded the indicators of this group by 136.17% and 178.43% ($p=0.02$), respectively. In the blood serum of animals with the KK genotype from Vologda region, the highest concentrations of nickel were recorded, exceeding levels in animals with the AA genotype by 60.81%, and in Leningrad region by 37.88%. Cows with the KK genotype in Vologda region showed higher milk yield, exceeding that of the AA genotype by 25.99% ($p=0.03$); in Leningrad region, the AA genotype showed 49.14% better results compared to KK, and in Orenburg region by 18.63% compared to AK. The conducted research confirms the significance of the K232A polymorphism of the *DGAT1* gene for breeding work.

Key words: cattle, Black-and-White breed, diacylglycerol-O-acyltransferase, K232A, elemental composition, milk production

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2024 FSBRI FRC BST RAS (FNWZ-2022-0011).

For citation: Tarasova EI, Polyakova VS, Sizova EA. Association of *DGAT1* gene polymorphism with the elemental composition of biosubstrates and productivity of black-and-white cows in the Leningrad, Vologda, and Orenburg Regions. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(3):8-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-3-8>

Введение.

Эффективное разведение высокопродуктивных молочных коров является одной из ключевых задач для развития молочной промышленности и животноводства (Wang Z and She X, 2023). В этом контексте особое внимание уделяется диацилглицерол-ацилтрансферазам (DGAT), которые представляют собой важную группу ферментов, катализирующих биосинтез триацилглицерина (Liu J et al., 2020). *DGAT1*, микросомальный фермент, отвечающий за присоединение жирного ацил-КоА к 1,2-диацилглицерину, в результате чего образуются коэнзим А и триглицерид (Kęsek-Woźniak MM et al., 2020). Этот фермент играет значительную роль в физиологических процессах, связанных с обменом глицеролипидов и триацилглицерина, включая всасывание жиров в кишечнике, синтез липопротеинов, образование жировой ткани и лактацию (Тарасова Е.И. и Нотова С.В., 2020).

Ген *DGAT1* локализован в центромерной области 14-й хромосомы и состоит из 17 экзонов, общая длина которого составляет 14117 пар нуклеотидов (Mahmoudi P and Rashidi A, 2023). Поли-

морфизм K232A, связанный с заменой аминокислоты лизин на аланин, возникает в результате мутации, при которой динуклеотид AA заменяется на GC в восьмом экзоне *DGATI*. Это наиболее изученный вариант в рамках ассоциативного анализа характеристик коровьего молока (Fink T et al., 2020). Исследования показали, что аллель K, представляющий «дикий тип», обладает более высокой скоростью реакции фермента, чем аллель A, что способствует повышению процентного содержания жира в молоке (Samuel B et al., 2023). Вариант лизина ассоциирован с более высоким уровнем жира и концентрацией белка в молоке, тогда как вариант аланина – с более высоким содержанием (Elzaki S et al., 2022). Кроме того, полиморфизм 5'-конца гена также ассоциирован с процентным содержанием жира в молоке (Fink T et al., 2020).

Многочисленные исследования изучали влияние полиморфизма K232A на продуктивность и состав молока у различных пород крупного рогатого скота. Установлено, что степень влияния этого полиморфизма на концентрацию жира варьируется в зависимости от породы, что может быть следствием взаимодействий с генетическим фоном (Tumino S et al., 2021). Например, работы, проведённые ранее (Krovvidi S et al., 2021; Li Y et al., 2021; Gothwal A et al., 2023), показали различия в частотах аллелей мутации *DGATI* K232A среди популяций голштинской породы. Valenti B с коллегами (2019) отметили более сбалансированное распределение аллелей у голштинского крупного рогатого скота по сравнению с породами с повышенной частотой аллеля GC, кодирующего аланин (91 %). Исследование полиморфизма *DGATI* у румынских коров голштинской породы выявило связь между аллелем K и повышенными уровнями жира и жирных кислот (Elzaki S et al., 2022). У коров с генотипом AA наблюдается снижение уровня насыщенных жирных кислот и увеличение олеиновой кислоты (Singh A et al., 2023).

Кроме влияния на молочную продуктивность, полиморфизмы генов также могут оказывать значительное воздействие на минеральный обмен у животных. В период лактации коровы испытывают повышенные потребности в макро- и микроэлементах, что связано с интенсивным синтезом молока. Недостаток этих элементов может негативно сказаться на репродуктивной функции, общем состоянии здоровья и, в конечном итоге, на продуктивности (Vieira-Neto A et al., 2024). Например, кальций, фосфор и магний играют ключевую роль в формировании молока, а также в поддержании функций мышц и нервной системы, в то время как микроэлементы, такие как медь, цинк и селен, необходимы для различных метаболических процессов и поддержания иммунной системы.

Исследования показывают, что генетические факторы могут влиять на уровень и распределение этих элементов в организме животных. В частности, полиморфизм гена *DGATI* может оказывать косвенное влияние на минеральный обмен путем изменения метаболизма жиров и синтеза молока, что, в свою очередь, может повлиять на потребность и усвоение макро- и микроэлементов (Faraj SH and Yheia A, 2020). В работе Kharlamov AV с соавторами (2021) было продемонстрировано, что определённые генотипы могут коррелировать с изменениями элементного статуса, так как гомозиготные генотипы накапливают различные токсичные и эссенциальные элементы в шерсти.

В связи с этим понимание того, как полиморфизм K232A гена *DGATI* воздействует на содержание макро- и микроэлементов в организме коров, имеет значение для оптимизации таких факторов, как рацион и условия содержания, с целью повышения продуктивности и здоровья животных. Таким образом, настоящая работа направлена на исследование ассоциации полиморфизма *DGATI* с элементным составом волоса и сыворотки крови, что может способствовать расширению нашего понимания о роли данного гена в метаболизме микроэлементов и их значении для здоровья и продуктивности животных.

Цель исследования.

Оценить влияние полиморфизма K232A гена *DGATI* на показатели элементного состава волоса, сыворотки крови и молочную продуктивность коров чёрно-пёстрой породы Ленинградской, Вологодской и Оренбургской областей.

Материалы и методы исследований.

Объект исследования. Исследование проводилось на коровах чёрно-пёстрой породы (n=90) трёх хозяйств: СПК ПКЗ «Вологодский» (Вологодская область), АО ПЗ «Первомайский» (Ленинградская область), АФ «Промышленный» (Оренбургская область). Число коров в группах было равным 30. Живая масса животных в период отбора составляла $450 \pm 15,6$ кг, возраст – 4-5 лет.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными», ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. В качестве биосубстратов в исследовании были использованы цельная кровь, отобранная из хвостовой вены в пробирки VACUETTE с активатором свёртывания крови и гелем для отделения эритроцитарной массы (Greiner Bio-One International AG, Австрия), образцы волос и молока. Для проведения генетических исследований кровь отбиралась в пробирки VACUETTE с антикоагулянтом К2-ЭДТА (2-замещенная калиевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты) (Greiner Bio-One International AG, Австрия).

Выделение ДНК производилось из цельной крови исследуемых животных с использованием набора реагентов для выделения геномной ДНК «М-сорб» («Синтол», Россия). Генотипирование ДНК проводилось методом высокопроизводительного секвенирования, реализуемого при помощи секвенатора MiSeq (*Illumina*, США) с использованием панели TruSeq Bovine Parentage Sequencing Panel (*Illumina*, США).

Элементный состав сыворотки крови и волос был изучен по 25 элементам (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sn, Hg, Sr, V, Zn) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D (Perkin Elmer Inc., Шелтон, США).

Произведённое молоко взвешивали индивидуально от каждой коровы ежедневно в течение трёх дней подряд. Содержание жира и белка в молоке оценивали с использованием процедуры FIL-IDF на приборе MilkoScan™ FT1 (FossElectric, DK-3400, Hillerød, Дания).

Оборудование и технические средства. Генотипирование проводилось на базе центра коллективного пользования Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (г. Оренбург) с использованием платформы MiSeq (*Illumina*, США). Определение содержания элементов в образцах сыворотки крови производилось в аккредитованной Испытательной лаборатории АНО «Центр биотической медицины» (ИСО 9001:2008 сертификат 54Q10077 т 21.05.2010 г.; г. Москва, Россия) с использованием масс-спектрометра NexION 300D (Perkin Elmer Inc., Шелтон, США).

Статистическая обработка. Статистическая обработка данных проводилась с использованием «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США). В данных о содержании металлов и микроэлементов в сыворотке животных, в качестве описательных статистик использовались значения медианы и соответствующих границах 25-75 центильного интервала. Достоверность погрупповых различий проверяли при помощи U-критерия Манна-Уитни. Оценку соответствия частот генотипов равновесию Харди-Вайнберга проводили с использованием критерия χ^2 Пирсона (при $p > 0,05$ равновесие выполняется). Сравнение частот генотипов и аллелей проводили с помощью критерия χ^2 для таблицы сопряжённости 2×2 . Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p), при этом критический уровень значимости в данном исследовании принимался меньшим или равным 0,05.

Результаты исследований.

В настоящем исследовании было обнаружено три варианта гена *DGAT1*: КК, АК, и АА. В популяции коров чёрно-пёстрой породы частота встречаемости аллеля К была значительно ниже по сравнению с аллелем А и составляла 0,278. Было обнаружено всего 5 особей с генотипом КК, и частота встречаемости генотипа была равной 5,56 %, наиболее часто встречающимся генотипом оказался вариант АА и был обнаружен у 50,0 % особей, частота встречаемости гетерозиготного генотипа АК составила 44,4 %. Значение критерия χ^2 , равное 0,01, показывает, что распределение частот генотипов не отклоняется от равновесного состояния по Харди-Вайнбергу (табл. 1).

Таблица 1. Частота встречаемости генотипов и аллелей гена *DGAT1*
Table 1. Frequency of occurrence of genotypes and alleles of the *DGAT1* gene

Показатель/ <i>Indicator</i>	Частота генотипа / <i>Genotype frequency</i>			Частота аллеля $\pm m_K (m_A)$ / <i>Allele frequency $\pm m_K (m_A)$</i>		χ^2
	КК	АК	АА	К $\pm m_K$	А $\pm m_A$	
Число особей / <i>Number of individuals</i>	5	40	45			
Наблюдаемое распределение, % / <i>Observed distribution, %</i>	5,56	44,44	50,0	0,278 \pm 0,03	0,722 \pm 0,03	0,01
Ожидаемое распределение, % / <i>Expected distribution, %</i>	7,72	40,13	52,16			

Примечание: $m_K (m_A)$ – ошибка частот аллелей, χ^2 – критерий соответствия

Note: $m_K (m_A)$ – allele frequency error, χ^2 – likelihood ratio criterion

Анализ элементного состава волос животных Вологодской области показал, что у коров с генотипом КК обнаруживался более высокий уровень калия, на 29,73 % превышающий группу животных с генотипом АА и на 11,52 % – группу АК. Также наблюдалась тенденция к более высоким концентрациям никеля, который может играть определённую роль в обмене веществ животных, однако токсичен в высоких концентрациях, различия составляли 33,92 % в сравнении с группой, имеющей генотип АА, и 68,81 % по сравнению с генотипом АК. Данная группа также характеризовалась более высокими уровнями свинца в волосе животных – на 64,21% превышающие показатели группы животных с генотипом КА и 12,57 % – группу АА. Свинец является потенциально токсичным элементом и может негативно сказываться на здоровье и продуктивности животных. Стоит отметить, что в волосе животных с генотипом КК были наиболее низкие концентрации жизненно-необходимых элементов, включая макроэлементы кальций, магний и фосфор, а также микроэлементы медь, железо и йод.

Молочные коровы с генотипом АК имели более высокие концентрации селена, способствующего укреплению иммунной системы животных, на 13,23 % по сравнению с генотипом АА ($p=0,03$) и 17,5 % – в сравнении с группой КК. Также у коров с генотипом АК было отмечено более высокое содержание кальция, необходимого для формирования костной ткани и обеспечения правильной лактации, на 10,36 % и йода, обеспечивающего нормальное функционирование щитовидной железы, на 10,24 % в сравнении с группой АА и на 18,93 % и 18,63 % соответственно – относительно группы КК.

Генотип АА был ассоциирован с более высоким содержанием железа, играющего ключевую роль в доставке кислорода к тканям, что особенно важно для молочных коров, так, содержание данного элемента в волосах оказалось выше на 136,17 % в сравнении с группой, имеющей генотип КК. Также в данной группе животных уровень кобальта, необходимого для синтеза витамина В12, который влияет на метаболизм и здоровье животных, был выше на 52,43 %, концентрация меди – на 13,74 %, марганец, играющий важную роль в обмене веществ и здоровье репродуктивной системы, оказался выше на 31,10 %, магний – на 31,22 % и фосфор, критически важный для энергетического обмена – на 24,84 % выше по сравнению с группой животных, имеющей генотип КК (рис. 1).

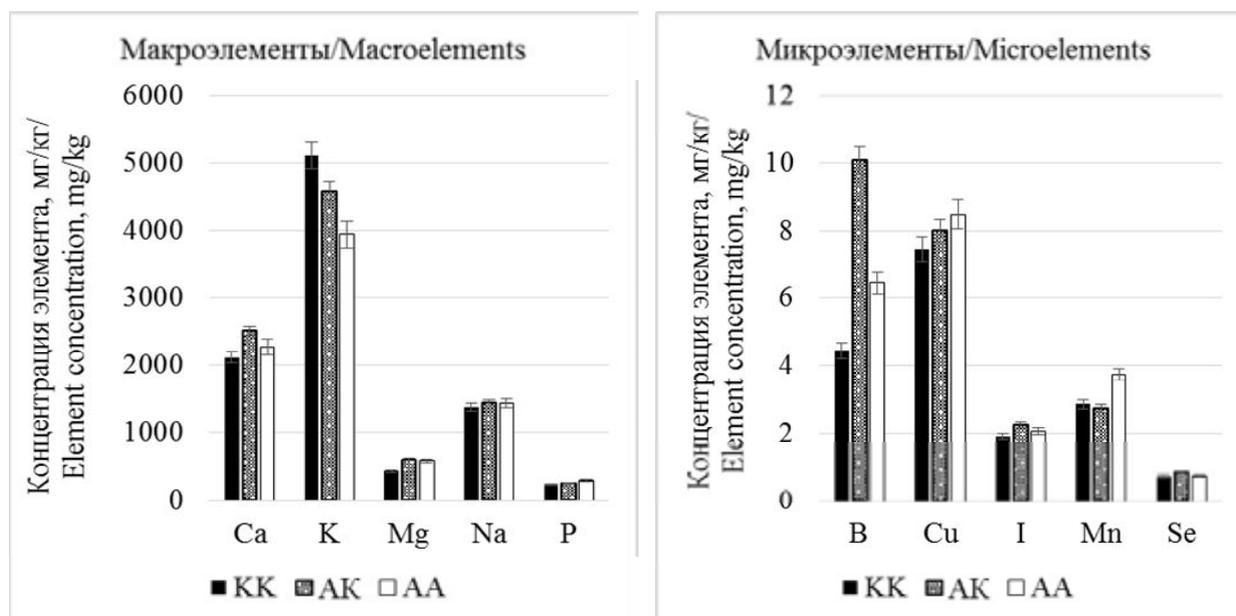
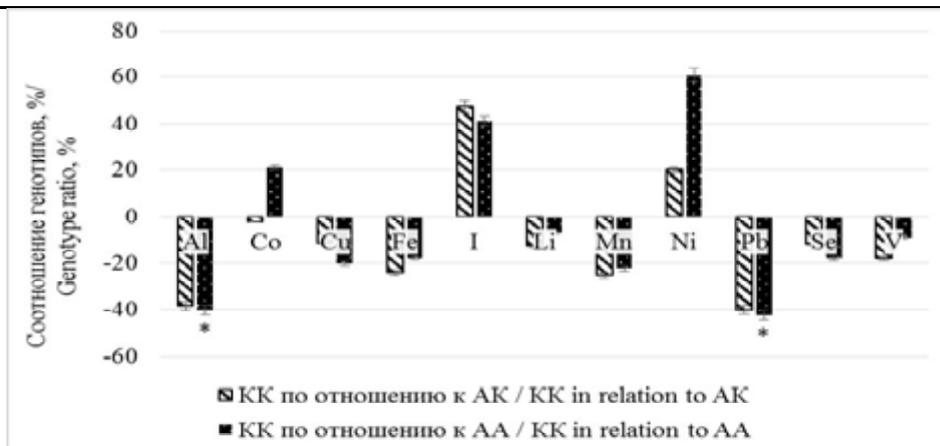


Рисунок 1. Содержание макро- и микроэлементов в волосе коров Вологодской области
Figure 1. The content of macro- and microelements in the wool of cows from the Vologda region

В сыворотке крови животных Вологодской области с генотипом КК также наблюдалась аналогичная тенденция к повышенным уровням никеля (на 60,81 %) по сравнению с группой животных с генотипом АА. Также в группе жизненно-необходимых элементов у данных животных отмечались более высокие показатели йода, на 41,27 % превышающие группу с генотипом АА. Концентрации алюминия, который может оказывать токсичное действие на организм, у животных с генотипом КК были ниже на 38,4 % по сравнению с генотипом АК и на 40,24 % ($p=0,04$) – по сравнению с генотипом АА, свинца – на 40,0 % и на 42,31 % ($p=0,02$) соответственно, что подчеркивает потенциально более благоприятный генотип для здоровья и продуктивности в данном хозяйстве (рис. 2). У животных с генотипом АК были зафиксированы более высокие концентрации ванадия, который может участвовать в различных метаболических процессах, на 10,7 % ($p=0,05$) выше по сравнению с генотипом АА. Генотип АА был ассоциирован с более высокими показателями селена – на 21,46 % выше относительно группы КК. Также у данных животных отмечалась тенденция к более высоким показателям фосфора, меди и железа.

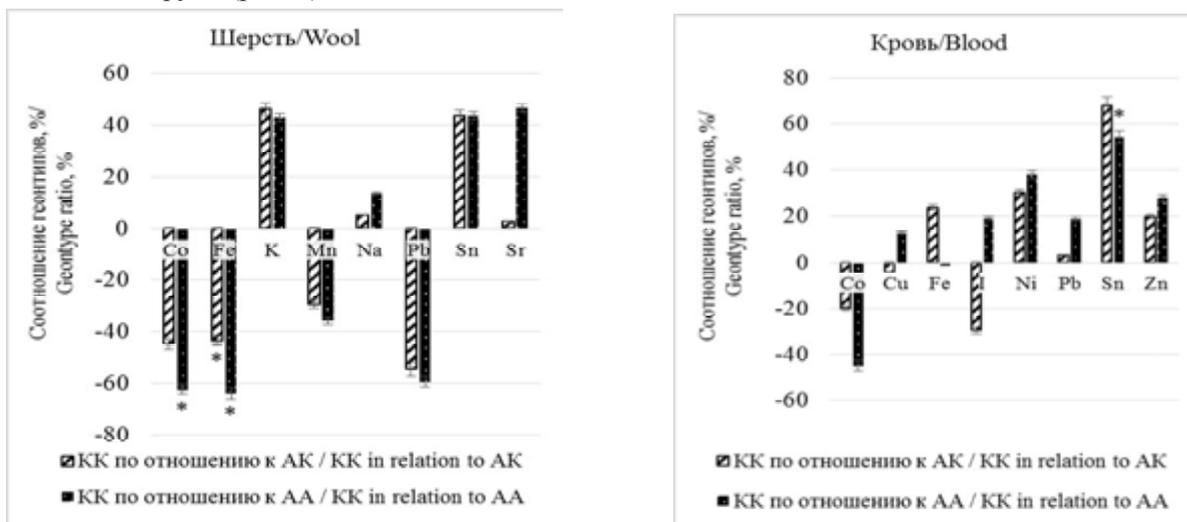


Примечание: * – $p \leq 0,05$ при сравнении генотипов между собой
Note: * – $p \leq 0.05$ when comparing genotypes with each other

Рисунок 2. Различия элементного состава сыворотки крови коров Вологодской области между аллельными вариантами гена *DGAT1*

Figure 2. Differences in the elemental composition of blood serum of cows from the Vologda region between allelic variants of the *DGAT1* gene

В результате изучения элементного состава волос животных Ленинградской области было выявлено, что генотип КК характеризовался наименьшим содержанием железа, необходимого для синтеза гемоглобина и транспортировки кислорода, различия с генотипом АК составили 43,37 % ($p=0,03$), а с генотипом АА – 64,08 % ($p=0,02$). В макроэлементном составе наблюдались наиболее высокие концентрации калия и натрия, которые оказались на 43,01% и 13,77 % выше в сравнении с группой АА. Содержание кобальта в данной группе было достоверно ниже на 62,38 % ($p=0,03$) по сравнению с генотипом АА и 44,75 % – в сравнении с генотипом АК. Содержание токсичных элементов стронция и олова у животных данной группы оказалось максимальным относительно остальных групп (рис. 3).



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении генотипов между собой
Note: * – $P \leq 0.05$ when comparing genotypes with each other

Рисунок 3. Различия элементного состава волос и сыворотки крови коров Ленинградской области между аллельными вариантами гена *DGAT1*

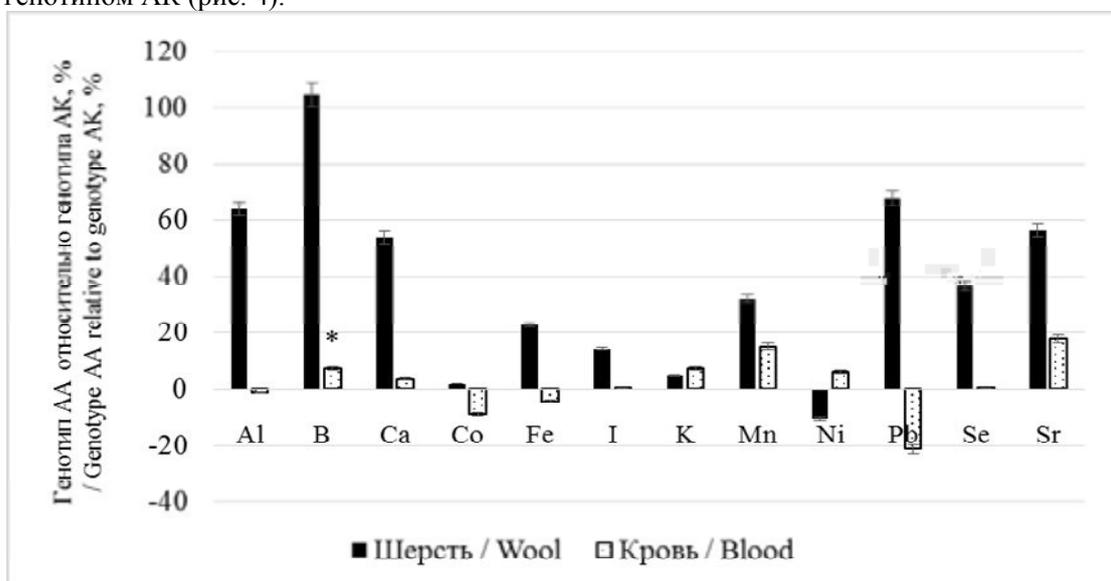
Figure 3. Differences in the elemental composition of hair and blood serum of cows from the Leningrad region between allelic variants of the *DGAT1* gene

У животных с генотипом АК были определены наиболее низкие концентрации лития по сравнению с генотипом АА, сниженные на 40,64 % ($p=0,04$), и наиболее высокое содержание кальция, критически важного для формирования молока и поддержания здоровья костей, увеличенное на 51,96 % относительно группы АА.

У животных с генотипом АА наблюдалась тенденция к более высоким концентрациям марганца – на 55,82 %, фосфора – на 13,04 % и меди – на 15,73 % выше, чем у животных с генотипом КК. Также статистически значимые различия были зафиксированы в отношении железа, уровень которого в волосе животных с генотипом АА оказался на 178,43% ($p=0,03$) выше, чем в группе КК и на 57,69 % выше, чем в группе АК.

Результаты элементного состава сыворотки крови животных Ленинградской области с генотипом АК демонстрировали более высокие концентрации большинства жизненно-необходимых элементов, например, меди – на 17,87 %, йода – на 68,89 %, марганца – на 8,62 % по сравнению с генотипом АА и на 4,33 %, 41,83 % и 18,68 % соответственно – выше группы КК. У животных с генотипом АА наблюдалось более высокое содержание железа – на 25,14 % выше относительно группы с генотипом АК, однако содержание меди и йода оказалось ниже, чем в других исследуемых группах. Генотип КК был ассоциирован с высоким содержанием олова на 54,17 % ($p=0,02$) и свинца – на 18,91 % по сравнению с генотипом АА, а также с тенденцией к повышению уровней никеля на 37,88 % и цинка – на 27,67 %.

Далее, исследование полиморфизма K232A гена *DGAT1* у коров Оренбургской области показало наличие двух генотипов: гомозиготного АА и гетерозиготного АК. По результатам анализа элементного состава волос статистически значимых различий не было обнаружено. Тем не менее, в группе животных с генотипом АК наблюдалась тенденция к более высокому содержанию никеля – на 11,72 % по сравнению с гомозиготной группой АА. В группе с генотипом АА отмечались более высокие уровни алюминия на 63,84 %, бора – на 104,75 %, кальция – на 53,97 %, железа – на 22,91 %, йода – на 14,31 %, марганца – на 32,18 % и селена – на 36,83 % выше в сравнении с группой с генотипом АК (рис. 4).



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении генотипов между собой

Note: * – $P \leq 0.05$ when comparing genotypes with each other

Рисунок 4. Различия элементного состава волос и сыворотки крови коров Оренбургской области между аллельными вариантами гена *DGAT1*

Figure 4. Differences in the elemental composition of hair and blood serum of cows from the Orenburg region between allelic variants of the *DGAT1* gene

В элементном составе крови животных с генотипом АА было обнаружено более высокое содержание бора – на 7,14 % ($p=0,04$) по сравнению с гетерозиготными животными, а также наблюдалась тенденция к более высоким концентрациям кальция – на 3,63 %, калия – на 7,27 % и стронция – на 17,74 %. Группа животных с генотипом АК демонстрировала более высокие уровни кобальта на 9,68 % и свинца – на 27,1 % по сравнению с гомозиготным генотипом.

Анализ продуктивных показателей животных Вологодской области показал достоверные различия в среднесуточном удое. Наиболее высокие показатели отмечены у животных с генотипом КК – на 29,84 % ($p=0,03$) по сравнению с выборкой АК и на 25,99 % ($p=0,03$) – с выборкой АА (рис. 5).

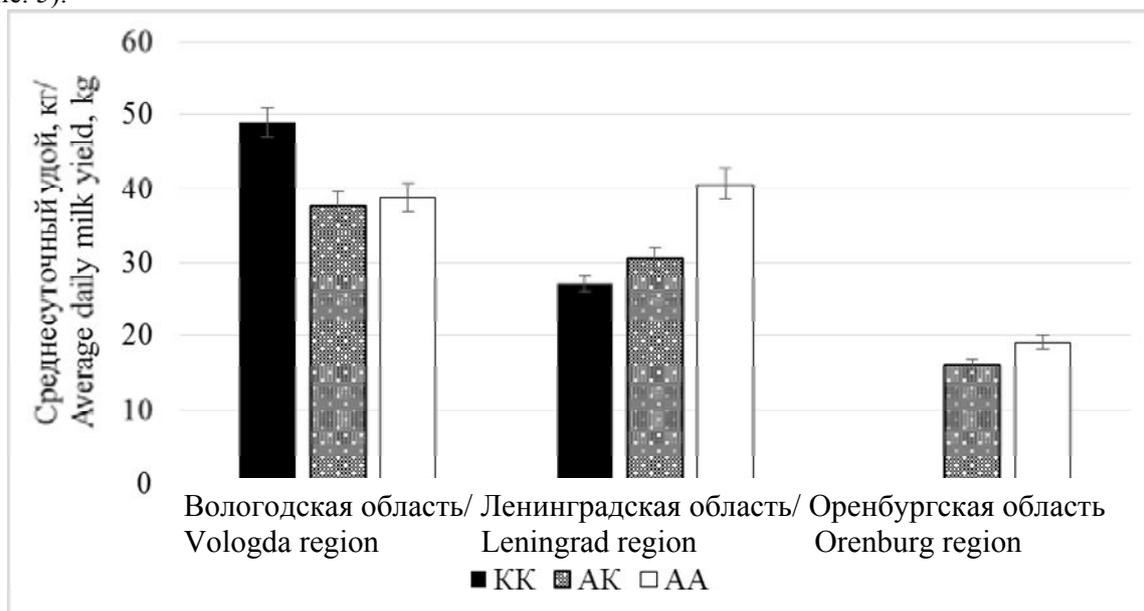


Рисунок 5. Показатели среднесуточного удоя коров Вологодской, Ленинградской и Оренбургской областей

Figure 5. Indicators of average daily milk yield of cows from the Vologda, Leningrad and Orenburg regions

Показатель среднесуточного удоя коров Ленинградской и Оренбургской областей не имел статистически значимых различий между группами, однако наблюдалась тенденция к более высоким показателям удоя у животных с генотипом АА. Так, показатель среднесуточного удоя у особей с генотипом АА в Ленинградской области оказался выше на 33,26% по сравнению с группой АК и 49,14 % – относительно группы КК, в Оренбургской области разница с генотипом АК составила 18,63 %. Значимых различий в массовой доле жира и белка среди генотипов также не выявлено.

Исследование влияния полиморфизма К232А гена *DGAT1* на элементный состав волоса и крови, а также на молочную продуктивность коров чёрно-пёстрой породы показало значимые различия между генотипами. В частности, установлено, что различные генотипы (КК, АК, АА) были ассоциированы с различиями в концентрациях определённых микроэлементов, что в свою очередь влияло на молочную продуктивность коров. Эти результаты подчеркивают вклад генетического полиморфизма в формирование биохимических свойств организма, а также его влияние на продуктивные показатели.

Обсуждение полученных результатов.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о влиянии каждого генотипа *DGAT1* на элементный статус и продуктивные характеристики животных различных областей.

Генотип КК был ассоциирован с высокой молочной продуктивностью в Вологодской области, но также показал проблемы с уровнем некоторых микроэлементов (например, низкие уровни железа). Этот генотип продемонстрировал высокие показатели удоя, однако наличие повышенных уровней потенциально токсичных элементов в Ленинградской и Оренбургской областях (таких как никель, олово и свинец) может вызвать опасения относительно долгосрочного здоровья животных.

Генотип АК проявлял некое преимущество в определённых жизненно-необходимых элементах, что позволяет говорить о возможной сбалансированности питания и здоровья животных с данным генотипом. Тем не менее, в Оренбургской области наблюдались повышенные уровни никеля, что указывает на необходимость внимания к качеству кормов и их воздействию на здоровье животных. Важно отметить, что, несмотря на некоторые отклонения в элементном составе, массовая доля жира и белка в молоке оставалась на стабильном уровне, что свидетельствует о сохранении качества продукции. Генотип АК требует более глубокого анализа и мониторинга состояния здоровья с целью минимизации влияния токсичных элементов и улучшения рациона.

Исследование коров с генотипом АА в трёх различных хозяйствах показало, что этот генотип имеет свои уникальные характеристики. Генотип АА продемонстрировал высокую продуктивность во всех регионах, но его показатели среднесуточного удоя оказались ниже, чем у животных с генотипом КК в Вологодской области. В сыворотке крови коров с генотипом АА уровни токсичных микроэлементов находились в пределах нормы, что говорит о хорошем состоянии здоровья животных и правильном рационе. Эти наблюдения подчеркивают важность обеспечения коров необходимыми микроэлементами для поддержания их здоровья и продуктивности. Тем не менее результаты указывают на необходимость продолжения мониторинга состояния здоровья и элементного состава, чтобы избежать возникновения проблем, связанных с накоплением токсичных элементов. Таким образом, генотип АА имеет свои преимущества, и дальнейшие исследования в данной области могут предоставить ценные данные для селекции, улучшения здоровья и продуктивности коров в различных регионах.

Элементы, содержащиеся в волосах животных, могут служить индикаторами избыточного накопления в организме (Miroshnikov S et al., 2019), а также быть ассоциированными с продуктивными показателями молочных коров (Мирошников С.А. и др., 2019; Казакова Т.В. и др., 2020). Анализ состава волос может дать ценную информацию о здоровье и питании животных, поскольку волосы являются постоянным источником для оценки микроэлементного статуса, отражая не только краткосрочные изменения в рационе, но и более устойчивые кумулятивные эффекты (Lim HJ et al., 2024). В Вологодской области в волосе коров с генотипом АА было зафиксировано, что содержание марганца было выше на 31,10 % по сравнению с генотипом КК, а в Ленинградской области – на 55,82 %. Содержание железа у животных с генотипом АА также оказалось значительно выше – на 136,17 % в Вологодской области и на 178,43 % – в Ленинградской области ($p=0,02$). Железо является жизненно важным микроэлементом, необходимым для синтеза гемоглобина, который отвечает за транспортировку кислорода в организме. Кроме того, оно участвует в нескольких физиологических процессах, таких как иммунный ответ и энергетический обмен, а также выполняет ключевую роль в кроветворной функции. Железо необходимо для поддержания общего здоровья животных, и его дефицит может приводить к анемии и другим заболеваниям (VanEmon M et al., 2020). Стоит отметить, что железо характеризуется высокой биодоступностью и, благодаря своим свойствам, редко вызывает токсические реакции у крупного рогатого скота (Perillo L et al., 2021). Это делает его особенно важным элементом в рационе животных. Марганец, в свою очередь, выполняет ключевую функцию в процессе воспроизводства и развития плода, а также участвует в синтезе холестерина, который необходим для формирования стероидных гормонов, таких как прогестерон, эстроген и тестостерон (VanEmon M et al., 2020). Эти гормоны не только регулируют репродуктивные процессы, но и влияют на общий обмен веществ в организме. Нормальный уровень марганца также играет важную роль в поддержании здоровья суставов и костей, а его дефицит может привести к различным патологиям, включая нарушения воспроизводительной функции. Таким образом, поддержание нормального уровня микроэлементов, таких как железо и марганец, является крити-

чески важным для здоровья и продуктивности молочных коров, что также подчеркивает значение генотипической предрасположенности в этих процессах.

Повышение концентрации микроэлементов в молоке и сыворотке крови молочных коров имеет важное значение как для здоровья животных, так и для питательной ценности молока (Vieira-Neto A et al., 2024). Эти микроэлементы выполняют множество функций в организме, включая участие в метаболизме, иммунной активности и репродуктивных процессах. Наиболее заметное влияние уровни микроэлементов оказывают на молочную продуктивность дойных коров, так как их наличие в сыворотке крови связано с физиологическими процессами, необходимыми для полноценного периода лактации (Sizova EA et al., 2022).

Особенно важным является уровень кальция, который играет ключевую роль в осуществлении ряда физиологических функций, включая сокращение мышц, передачу нервных импульсов и формирование костной ткани. Согласно исследованию (Zhang X et al., 2020), низкий уровень кальция оказался фактором риска снижения надоев у молочных коров. Это подчеркивает важность поддержания оптимального уровня кальция в рационе. В настоящем исследовании было установлено, что у животных с генотипом АА, демонстрирующих более высокие показатели удоя в Ленинградской и Оренбургской областях, также были обнаружены повышенные концентрации кальция в сыворотке крови – на 4,89 % в Ленинградской области по сравнению с группой КК, а также на 3,63 % – в Оренбургской области относительно группы АК. Это свидетельствует о том, что генотип может оказывать значительное влияние на метаболизм микроэлементов, что, в свою очередь, отражается на продуктивности.

Низкое содержание кальция у животных с генотипом КК в Вологодской области может быть связано с высоким уровнем калия, который обратно пропорционален содержанию кальция в биосубстратах (Miroshnikov S et al., 2021). Повышенные уровни калия могут затруднять усвоение кальция, что, в свою очередь, может сказаться на общем состоянии здоровья животных и их молочной продуктивности. Однако следует отметить, что при высоких концентрациях бора наблюдается увеличение усвоения кальция, магния и фосфора (Abdelnour SA et al., 2018). В нашем исследовании это явление было отмечено у животных с генотипом АА в Оренбургской области, что указывает на необходимость дальнейшего изучения микроэлементного состава кормов и его воздействия на продуктивные показатели молочных коров. Это также подтверждает, что правильное соотношение микроэлементов в рационе животных имеет решающее значение для поддержания их здоровья и продуктивности.

В настоящем исследовании была зафиксирована ассоциация генотипа КК с высокими концентрациями никеля, олова и свинца в сыворотке крови животных в ряде хозяйств. В Вологодской области содержание никеля оказалось выше на 60,81 %, в Ленинградской области – на 37,88 % по сравнению с животными с генотипом АА, а содержание свинца и олова – на 18,91 % и 54,16 % ($p=0,02$) соответственно. Никель является важным элементом, который играет значительную роль во многих биохимических и физиологических процессах. Он функционирует как кофактор для ряда ферментов, участвующих в метаболизме, а также может оказывать влияние на активность некоторых гормонов. Например, никель необходим для синтеза некоторых белков и может способствовать улучшению функций клеточных мембран. Однако при превышении определенных уровней никель может стать токсичным, вызывая ряд негативных эффектов. Токсичность никеля может приводить к повреждению клеток, изменению активности ферментов и гормонов, а также к окислительному стрессу. Окислительный стресс возникает, когда в организме происходит избыток свободных радикалов, что может негативно сказаться на здоровье животных, приводя к заболеваниям, снижению иммунитета и ухудшению общего состояния организма (Boudebbouz A et al., 2021; Нотова С.В. и др., 2022). Известно, что повышение концентраций токсичных микроэлементов, таких как никель, часто коррелирует с содержанием свинца (Miroshnikov S et al., 2021). Свинец, как и никель, представляет собой токсичный элемент, который может оказывать негативное влияние на здоровье животных. Он накапливается в организме и со временем может вызывать отравление, приводя к нарушению функций нервной и иммунной систем, а также к расстройствам в работе ор-

ганов. В нашем исследовании у коров Вологодской области уровень свинца оказался ниже на 42,31 % ($p=0,02$) в сравнении с генотипом АА. Это указывает на влияние окружающей среды и кормления на содержание этих токсичных микроэлементов в организме животных, что требует дальнейшего изучения для обеспечения здоровья и продуктивности молочных коров.

Согласно нашим предыдущим исследованиям, молочная продуктивность крупного рогатого скота определяется генетическими особенностями, что делает генетическое совершенствование важным направлением для повышения уровня молока у коров с экономической точки зрения (Тарасова Е.И. и др., 2024). Генетический полиморфизм, особенно такие мишени, как полиморфизм K232A гена *DGATI*, оказывает значительное влияние на производственные характеристики. Например, в исследовании Li Y и коллег (2021) было обнаружено, что коровы с генотипом КК производят меньшее количество молока по сравнению с коровами с генотипом АА. Это подчеркивает важность генетического анализа для выбора животных для племенной работы.

В данном исследовании, напротив, было выявлено, что в Вологодской области высокие показатели удоя связаны с генотипом КК, тогда как в Ленинградской и Оренбургской областях более высокие показатели удоя наблюдаются у коров с генотипом АА. Эти результаты демонстрируют, что местные условия, такие как климат, кормление и содержание, могут влиять на реализацию генетического потенциала животных, что важно учитывать при составлении племенных программ.

Кроме того, полиморфизм K232A оказывает заметное положительное влияние на содержание жира и белка в молоке у коров с генотипом КК, как было отмечено в исследовании (Li Y et al., 2021). В другом исследовании (Mahmoudi P and Rashidi A, 2023) было продемонстрировано, что генотипы АА и АК положительно влияют на жирность молока. По нашим наблюдениям не было обнаружено статистической значимости в содержании жира и белка молока трёх хозяйств. Это может указывать на то, что влияние генетических вариаций может быть менее заметным в определённых условиях или в контексте других факторов, таких как питание и содержание стад.

Таким образом, можно заключить, что генотипы АА и КК обладают разной племенной ценностью. Генотип АА по сравнению с генотипом КК продемонстрировал большую молочную продуктивность, что проявляется в среднем или более высоком уровне среднесуточного удоя коров трёх хозяйств (Fink T et al., 2020). Кроме того, генотип АА имеет потенциальные преимущества в отношении содержания жизненно необходимых макро- и микроэлементов, что может способствовать общей продуктивности и здоровью животных. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований и генетического анализа для оптимизации племенных программ и улучшения молочной продуктивности дойных коров.

Заключение.

Исследование элементного состава и продуктивности молочных коров в хозяйствах Вологодской, Ленинградской и Оренбургской областей выявило значимые зависимости между генотипами *DGATI* и содержанием элементов, а также продуктивными показателями животных.

1. Влияние генотипа на содержание микроэлементов. Коровы с генотипом АА в большинстве случаев демонстрировали более высокие уровни критически важных макро- и микроэлементов, таких как кальций, железо и марганец, что может способствовать улучшению здоровья и увеличению молочной продуктивности. В частности, в Вологодской области уровень железа у АА был значительно выше в сравнении с КК, что указывает на адаптационную эффективность этого генотипа к условиям содержания.

Генотип КК, напротив, был ассоциирован с более высокими концентрациями токсичных микроэлементов, таких как никель, олово и свинец, что может негативно сказываться на здоровье животных и ограничивать их продуктивность. Наиболее высокое содержание никеля наблюдалось у животных Вологодской области, где данный показатель оказался выше на 60,81 % по сравнению с АА.

2. Продуктивные показатели. В Вологодской области коровы с генотипом КК показали наиболее высокие среднесуточные удои, что говорит о том, что в условиях данного региона этот генотип может иметь определённые преимущества. Однако в Ленинградской и Оренбургской областях преобладание продуктивности у коров с генотипом АА подчеркивает влияние экологических и кормовых факторов, а также возможные генетические предрасположенности этих групп к более высокому удою.

Данное исследование показывает важность изучения генетических особенностей животных для оптимизации их продуктивности, а также подтверждает потенциальную ценность генотипа АА полиморфизма *K232A DGAT1* для селекционных работ.

Список источников

1. Изучение влияния тяжёлых металлов и их смесей на организм (обзор) / С.В. Нотова, О.В. Маршинская, Т.В. Казакова, А.М. Мифтахова // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 19-33. [Notova SV, Marshinskaya OV, Kazakova TV, Miftakhova AM. Study of the influence of heavy metals and their mixtures on the body (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):19-33. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-19.

2. Суммарное накопление тяжёлых металлов-микроэлементов в шерсти в связи с молочной продуктивностью коров / Т.В. Казакова, О.В. Маршинская, С.А. Мирошников, С.В. Нотова, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, Е.А. Тяпугин // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 2. С. 8-23. [Kazakova TV, Marshinskaya OV, Miroshnikov SA, Notova SV, Zavyalov OA, Frolov AN, Tyapugin EA. Total accumulation of heavy trace metals in hair caused by milk production of cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(2):8-23. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-2-8.

3. Тарасова Е.И., Нотова С.В. Гены-маркеры продуктивных характеристик молочного скота (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 58-80. [Tarasova EI, Notova SV. Gene markers of the productive characteristics of dairy cattle (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):58-80. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-58

4. Тарасова, Е.И., Полякова В.С., Сизова Е.А. Полиморфизм гена *DGAT1* и его связь с элементным составом крови и молочной продуктивностью черно-пестрых коров / Актуальные вопросы и инновации в животноводстве: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. С.Г. Леушина, 300-летию Российской академии наук. г. Оренбург, 22-23 мая 2024 года. Оренбург: изд-во ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН, 2024. С. 9-13. [Tarasova EI, Polyakova VS, Sizova EA. Polimorfizm gena *DGAT1* i ego svyaz' s elementnym sostavom krovi i molochnoj produktivnost'yu cherno-pestryh korov (Conference proceedings) Aktual'nye voprosy i innovacii v zhivotnovodstve: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya prof. S.G. Leushina, 300-letiyu Rossiiskoi akademii nauk. g. Orenburg, 22-23 maya 2024 goda. Orenburg: izd-vo FGBNU FNTs BST RAN, 2024:9-13. (*In Russ.*)].

5. Феномен нагруженного метаболизма и продуктивность молочных коров / С.А. Мирошников, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, М.Я. Курилкина // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 2. С. 30-45. [Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Kurilkina MYa. The phenomenon of loaded metabolism and productivity of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(2):30-45. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-30

6. Abdelnour SA, Abd El-Hack ME, Swelum AA, Perillo A, Losacco C. The vital roles of boron in animal health and production: A comprehensive review. *J Trace Elem Med Biol*. 2018;50:296-304. doi: 10.1016/j.jtemb.2018.07.018

7. Boudebbouz A, Boudalia S, Bousbia A, Habila S, Boussadia MI, Gueroui Y. Heavy metals levels in raw cow milk and health risk assessment across the globe: A systematic review. *Sci Total Environ*. 2021;751:141830. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141830

8. Elzaki S, Korkuć P, Arends D, Reissmann M, Brockmann GA. Effects of *DGAT1* on milk performance in Sudanese butana×Holstein crossbred cattle. *Trop Anim Health Prod.* 2022;54(2):142. doi: 10.1007/s11250-022-03141-7
9. Faraj SH, Yheia A. *DGAT1* gene polymorphism and its relationships with cattle milk yield and chemical composition. *Periódico Tchê Química.* 2020;17(35):174-180.
10. Fink T, Lopdell TJ, Tiplady K, Handley R, Johnson TJJ, Spelman RJ, Davis SR, Snell RG, Littlejohn MD. A new mechanism for a familiar mutation - bovine *DGAT1* K232A modulates gene expression through multi-junction exon splice enhancement. *BMC Genomics.* 2020;21(1):591. doi: 10.1186/s12864-020-07004-z
11. Gothwal A, Magotra A, Bangar YC, Malik BS, Yadav AS, Garg AR. Candidate K232A mutation of *DGAT1* gene associated with production and reproduction traits in Indian Dairy cattle. *Anim Biotechnol.* 2023;34(7):2608-2616. doi: 10.1080/10495398.2022.2109041
12. Kęsek-Woźniak MM, Wojtas E, Zielak-Steciwko AE. Impact of SNPs in *ACACA*, *SCDI*, and *DGAT1* genes on fatty acid profile in bovine milk with regard to lactation phases. *Animals.* 2020;10(6):997. doi: <https://doi.org/10.3390/ani10060997>
13. Kharlamov AV, Frolov AN, Zavyalov OA. Technology for detecting highly productive animals based on elemental status assessment (Conference proceedings). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Omsk City, Western Siberia, 04–05 July 2020. Omsk City, Western Siberia, 2021;624:012023. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012023
14. Krovvidi S, Thiruvankadan AK, Murali N, Saravanan R, Vinoo R, Metta M. Evaluation of non-synonym mutation in *DGAT1* K232A as a marker for milk production traits in Ongole cattle and Murrah buffalo from Southern India. *Trop Anim Health Prod.* 2021;53(1):118. doi: 10.1007/s11250-021-02560-2
15. Li Y, Zhou H, Cheng L, Edwards GR, Hickford JGH. Effect of *DGAT1* variant (K232A) on milk traits and milk fat composition in outdoor pasture-grazed dairy cattle. *New Zealand Journal of Agricultural Research.* 2021;64(1):101-113. <https://doi.org/10.1080/00288233.2019.1589537>
16. Lim HJ, Lee S, Park W, Park E, Yoo JG. Mineral patterns in hair: A decisive factor between reproducible and repeat breeder dairy cows. *PLoS One.* 2024;19(4):e0301362. doi: 10.1371/journal.pone.0301362
17. Liu J, Wang Z, Li J, Li H, Yang L. Genome-wide identification of Diacylglycerol Acyltransferases (*DGAT*) family genes influencing Milk production in Buffalo. *BMC Genet.* 2020;21(1):26. doi: 10.1186/s12863-020-0832-y
18. Mahmoudi P, Rashidi A. Strong evidence for association between K232A polymorphism of the *DGAT1* gene and milk fat and protein contents: A meta-analysis. *J Dairy Sci.* 2023;106(4):2573-2587. doi: 10.3168/jds.2022-22315
19. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
20. Miroshnikov S, Zavyalov O, Frolov A, Sleptsov I, Sirazetdinov F, Poberukhin M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019;26(18):18554-18564. doi: 10.1007/s11356-019-05163-5
21. Perillo L, Arfuso F, Piccione G, Dara S, Tropaia E, Cascone G, Licitra F, Monteverde V. Quantification of some heavy metals in hair of dairy cows housed in different areas from sicily as a bioindicator of environmental exposure—a preliminary study. *Animals.* 2021;11(8):2268. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11082268>
22. Samuel B, Dadi H, Dinka H. Effect of the *DGAT1* K232A mutation and breed on milk traits in cattle populations of Ethiopia. *Front Anim Sci.* 2023;4:1096706. doi: 10.3389/fanim.2023.1096706
23. Singh A, Malla WA, Kumar A, Jain A, Thakur MS, Khare V, Tiwari SP. Review: genetic background of milk fatty acid synthesis in bovines. *Trop Anim Health Prod.* 2023;55(5):328. doi: 10.1007/s11250-023-03754-6.

24. Sizova EA, Miroshnikov SA, Notova SV, Marshinskaya OV, Kazakova TV, Tinkov AA, Skalny AV. Serum and hair trace element and mineral levels in dairy cows in relation to daily milk yield. *Biol Trace Elem Res.* 2022;200(6):2709-2715. doi: 10.1007/s12011-021-02878-w
25. Tumino S, Criscione A, Moltisanti V, Marletta D, Bordonaro S, Avondo M, Valenti B. Feeding system resizes the effects of *DGAT1* polymorphism on milk traits and fatty acids composition in Modicana cows. *Animals (Basel).* 2021;11(6):1616. doi: 10.3390/ani11061616
26. Valenti B, Criscione A, Moltisanti V, Bordonaro S, De Angelis A, Marletta D, Di Paola F, Avondo M. Genetic polymorphisms at candidate genes affecting fat content and fatty acid composition in Modicana cows: effects on milk production traits in different feeding systems. *Animal.* 2019;13(6):1332-1340. doi: 10.1017/S1751731118002604
27. Van Emon M, Sanford C, McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals (Basel).* 2020;10(12):2404. doi: 10.3390/ani10122404
28. Vieira-Neto A, Lean IJ, Santos JEP. Periparturient mineral metabolism: implications to health and productivity. *Animals (Basel).* 2024;14(8):1232. doi: 10.3390/ani14081232
29. Wang Z, She X. Potential value of epistatic traits and milk production-related genes for screening high-yielding cows. *China Dairy.* 2023;4:51-56. doi: 10.12377/1671-4393.23.04.07
30. Zhang X, Wang Z, Shah AM, Hassan MF, Peng Q, Hu R, Zou H, Wang C, Xue B, Wang L and Jiang Y. Production performance, metabolic profile and calcium-regulating hormones of transition dairy cows with different blood calcium status after parturition. *Pak Vet J.* 2020;40(1):19-24. <http://dx.doi.org/10.29261/pakvetj/2019.085>

References

1. Notova SV, Marshinskaya OV, Kazakova TV, Miftakhova AM. Study of the influence of heavy metals and their mixtures on the body (review). *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(3):19-33. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-19
2. Kazakova TV, Marshinskaya OV, Miroshnikov SA, Notova SV, Zavyalov OA, Frolov AN, Tyapugin EA. Total accumulation of heavy trace metals in hair caused by milk production of cows. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2020;103(2):8-23. doi: 10.33284/2658-3135-103-2-8
3. Tarasova EI, Notova SV. Gene markers of the productive characteristics of dairy cattle (review). *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2020;103(3):58-80. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-58
4. Tarasova EI, Polyakova VS, Sizova EA. *DGAT1* gene polymorphism and its association with elemental composition of blood and milk productivity of Black-and-White cows (Conference proceedings) Current issues and innovations in animal husbandry: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Prof. S.G. Leushin, 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences. Orenburg, May 22-23, 2024. Orenburg: Publishing house of Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS, 2024: 9-13.
5. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Kurilkina MYa. The phenomenon of loaded metabolism and productivity of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2019;102(2):30-45. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-30.
6. Abdelnour SA, Abd El-Hack ME, Swelum AA, Perillo A, Losacco C. The vital roles of boron in animal health and production: A comprehensive review. *J Trace Elem Med Biol.* 2018;50:296-304. doi: 10.1016/j.jtemb.2018.07.018
7. Boudebbouz A, Boudalia S, Bousbia A, Habila S, Boussadia MI, Gueroui Y. Heavy metals levels in raw cow milk and health risk assessment across the globe: A systematic review. *Sci Total Environ.* 2021;751:141830. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141830
8. Elzaki S, Korku c P, Arends D, Reissmann M, Brockmann GA. Effects of *DGAT1* on milk performance in Sudanese butana×Holstein crossbred cattle. *Trop Anim Health Prod.* 2022;54(2):142. doi: 10.1007/s11250-022-03141-7

9. Faraj SH, Yheia A. *DGAT1* gene polymorphism and its relationships with cattle milk yield and chemical composition. *Periódico Tchê Química*. 2020;17(35):174-180.
10. Fink T, Lopdell TJ, Tiplady K, Handley R, Johnson TJJ, Spelman RJ, Davis SR, Snell RG, Littlejohn MD. A new mechanism for a familiar mutation - bovine *DGAT1* K232A modulates gene expression through multi-junction exon splice enhancement. *BMC Genomics*. 2020;21(1):591. doi: 10.1186/s12864-020-07004-z
11. Gothwal A, Magotra A, Bangar YC, Malik BS, Yadav AS, Garg AR. Candidate K232A mutation of *DGAT1* gene associated with production and reproduction traits in Indian Dairy cattle. *Anim Biotechnol*. 2023;34(7):2608-2616. doi: 10.1080/10495398.2022.2109041
12. Kęsek-Woźniak MM, Wojtas E, Zielak-Steciwo AE. Impact of SNPs in *ACACA*, *SCD1*, and *DGAT1* genes on fatty acid profile in bovine milk with regard to lactation phases. *Animals*. 2020;10(6):997. doi: <https://doi.org/10.3390/ani10060997>
13. Kharlamov AV, Frolov AN, Zavyalov OA. Technology for detecting highly productive animals based on elemental status assessment (Conference proceedings). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Omsk City, Western Siberia, 04–05 July 2020. Omsk City, Western Siberia, 2021;624:012023. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012023
14. Krovvidi S, Thiruvankadan AK, Murali N, Saravanan R, Vinoo R, Metta M. Evaluation of non-synonym mutation in *DGAT1* K232A as a marker for milk production traits in Ongole cattle and Murrah buffalo from Southern India. *Trop Anim Health Prod*. 2021;53(1):118. doi: 10.1007/s11250-021-02560-2
15. Li Y, Zhou H, Cheng L, Edwards GR, Hickford JGH. Effect of *DGAT1* variant (K232A) on milk traits and milk fat composition in outdoor pasture-grazed dairy cattle. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 2021;64(1):101-113. <https://doi.org/10.1080/00288233.2019.1589537>
16. Lim HJ, Lee S, Park W, Park E, Yoo JG. Mineral patterns in hair: A decisive factor between reproducible and repeat breeder dairy cows. *PLoS One*. 2024;19(4):e0301362. doi: 10.1371/journal.pone.0301362
17. Liu J, Wang Z, Li J, Li H, Yang L. Genome-wide identification of Diacylglycerol Acyltransferases (*DGAT*) family genes influencing Milk production in Buffalo. *BMC Genet*. 2020;21(1):26. doi: 10.1186/s12863-020-0832-y
18. Mahmoudi P, Rashidi A. Strong evidence for association between K232A polymorphism of the *DGAT1* gene and milk fat and protein contents: A meta-analysis. *J Dairy Sci*. 2023;106(4):2573-2587. doi: 10.3168/jds.2022-22315
19. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
20. Miroshnikov S, Zavyalov O, Frolov A, Sleptsov I, Sirazetdinov F, Poberukhin M. The content of toxic elements in hair of dairy cows as an indicator of productivity and elemental status of animals. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019;26(18):18554-18564. doi: 10.1007/s11356-019-05163-5
21. Perillo L, Arfuso F, Piccione G, Dara S, Tropia E, Cascone G, Licitra F, Monteverde V. Quantification of some heavy metals in hair of dairy cows housed in different areas from sicily as a bioindicator of environmental exposure—a preliminary study. *Animals*. 2021;11(8):2268. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11082268>
22. Samuel B, Dadi H, Dinka H. Effect of the *DGAT1* K232A mutation and breed on milk traits in cattle populations of Ethiopia. *Front Anim Sci*. 2023;4:1096706. doi: 10.3389/fanim.2023.1096706
23. Singh A, Malla WA, Kumar A, Jain A, Thakur MS, Khare V, Tiwari SP. Review: genetic background of milk fatty acid synthesis in bovines. *Trop Anim Health Prod*. 2023;55(5):328. doi: 10.1007/s11250-023-03754-6.
24. Sizova EA, Miroshnikov SA, Notova SV, Marshinskaya OV, Kazakova TV, Tinkov AA, Skalny AV. Serum and hair trace element and mineral levels in dairy cows in relation to daily milk yield. *Biol Trace Elem Res*. 2022;200(6):2709-2715. doi: 10.1007/s12011-021-02878-w

25. Tumino S, Criscione A, Moltisanti V, Marletta D, Bordonaro S, Avondo M, Valenti B. Feeding system resizes the effects of *DGAT1* polymorphism on milk traits and fatty acids composition in Modicana cows. *Animals (Basel)*. 2021;11(6):1616. doi: 10.3390/ani11061616
26. Valenti B, Criscione A, Moltisanti V, Bordonaro S, De Angelis A, Marletta D, Di Paola F, Avondo M. Genetic polymorphisms at candidate genes affecting fat content and fatty acid composition in Modicana cows: effects on milk production traits in different feeding systems. *Animal*. 2019;13(6):1332-1340. doi: 10.1017/S1751731118002604
27. Van Emon M, Sanford C, McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health. *Animals (Basel)*. 2020;10(12):2404. doi: 10.3390/ani10122404
28. Vieira-Neto A, Lean IJ, Santos JEP. Periparturient mineral metabolism: implications to health and productivity. *Animals (Basel)*. 2024;14(8):1232. doi: 10.3390/ani14081232
29. Wang Z, She X. Potential value of epistatic traits and milk production-related genes for screening high-yielding cows. *China Dairy*. 2023;4:51-56. doi: 10.12377/1671-4393.23.04.07
30. Zhang X, Wang Z, Shah AM, Hassan MF, Peng Q, Hu R, Zou H, Wang C, Xue B, Wang L and Jiang Y. Production performance, metabolic profile and calcium-regulating hormones of transition dairy cows with different blood calcium status after parturition. *Pak Vet J*. 2020;40(1):19-24. <http://dx.doi.org/10.29261/pakvetj/2019.085>

Информация об авторах:

Екатерина Ивановна Тарасова, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29.

Валентина Сергеевна Полякова, лаборант-исследователь лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29.

Елена Анатольевна Сизова, доктор биологических наук, руководитель центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29.

Information about the authors:

Ekaterina I Tarasova, Junior Researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Valentina S Polyakova, Laboratory Researcher of the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Elena A Sizova, Dr. Sci. (Biology), Head of the Centre for Nanotechnologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Статья поступила в редакцию 25.06.2024; одобрена после рецензирования 12.08.2024; принята к публикации 09.09.2024.

The article was submitted 25.06.2024; approved after reviewing 12.08.2024; accepted for publication 09.09.2024.