

УДК: 636.034:636.082

DOI:10.52419/issn2072-2419.2025.2.190

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПОИСКА МАРКЕРОВ И ИНДИКАТОРОВ ТЕРМОТОЛЕРАНТНОСТИ У КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА (ОБЗОР)

Сафина Н.Ю.\* – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. (ORCID 0000-0003-1184-3188); Муханина Е.Н. – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. (ORCID 0000-0001-9299-2104); Шакиров Ш.К. – д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр. (ORCID 0000-0002-3362-0463); Гайнутдинова Э.Р. – асп., науч. сотр. (ORCID 0000-0002-2970-1500)

Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства  
ФИЦ КазНЦ РАН

\*natysafina@gmail.com

**Ключевые слова:** крупный рогатый скот, тепловой стресс, биомаркер, продуктивность, удой, воспроизводство, термотолерантность, ген-маркер.

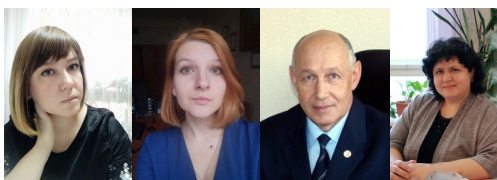
**Key words:** cattle, heat stress, biomarker, productivity, yield, reproduction, thermotolerance, gene-marker.

**Финансирование:** Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан (Соглашение от 16.12.2024 № 78/2024-ПД).

Поступила: 30.04.2025

Принята к публикации: 06.06.2025

Опубликована онлайн: 20.06.2025



### РЕФЕРАТ

Эффективность животноводства, особенно молочного, в условиях глобального потепления определяется комплексом факторов: климатическими условиями (тепловой стресс), кормовой базой, физиологическим состоянием животных и их генетической адаптивностью. Повышенные температуры провоцируют у скота комплексные нарушения, включая метаболические расстройства и снижение продуктивности. На фоне климатических изменений влияние теплового стресса на крупный рогатый скот представляет серьезную проблему для животноводства. Цель обзора: рассмотреть признаки адаптивных качеств и термотолерантности крупного рогатого скота. Исследования отечественных и зарубежных авторов показывают, что при превышении температурно-влажностного индекса (ТВИ) выше порогового значения ( $> 66$ ) у животных наблюдаются физиологические нарушения (рост ректальной температуры, учащение дыхания и др.), поведенческие изменения (снижение активности, уменьшение потребления корма и др.), биохимические сдвиги (повышение кортизола, рост кетоновых тел и др.), снижение продуктивности

(падение удоев, снижение содержания массовой доли жира и белка, изменение жирнокислотного состава, сокращение приростов живой массы), ухудшение репродуктивных функций (снижение оплодотворяемости, и ухудшение подвижности сперматозоиды). Исследования генетических показателей выявили ключевые маркеры термотолерантности, включая гены белков и факторов теплового шока (HSP и HSF), антиоксидантных ферментов, гены иммунитета и метаболизма. Однако селекция осложняется антагонизмом между продуктивностью и устойчивостью к стрессу. Для минимизации последствий негативного воздействия теплового стресса рекомендуется контролировать микроклимат (вентиляция, охлаждение) в животноводческих помещениях, оптимизировать кормление (вводить добавки антиоксидантов и витаминов) и применять, наряду с методами традиционной селекции, генетический отбор с использованием GWAS-анализа.

### **ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION**

Эффективность животноводства, особенно молочного, в условиях глобального потепления определяется комплексом факторов: климатическими условиями (тепловой стресс), кормовой базой, физиологическим состоянием животных и их генетической адаптивностью. Повышенные температуры провоцируют у скота комплексные нарушения, включая метаболические расстройства и снижение продуктивности. Ключевое значение имеет селекция на устойчивость к стрессу с учётом генетических маркеров терморегуляции, а также внедрение технологий содержания и кормления, минимизирующих негативное воздействие жары [1].

Физиологические индикаторы теплового стресса (частота дыхания, ректальная температура, слюноотечение) характеризуются низкой наследуемостью и полигенной природой, контролируются множеством QTL (локусы количественных признаков) с минимальным индивидуальным эффектом. Это ограничивает эффективность традиционной селекции, требуя применения высокотехнологичных методов, таких как геномная селекция на основе SNP-профилей (однонуклеотидные полиморфизмы) или комбинированные фенотипические индексы, учитывающие устойчивость в реальных условиях содержания [2].

Цель обзора – рассмотреть признаки адаптивных качеств и термотолерантности крупного рогатого скота.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS**

Мониторинг литературных источни-

ков осуществлялся по российским и зарубежным базам цитирования с использованием ключевых слов, связанных с тепловым стрессом у крупного рогатого скота: крупный рогатый скот, тепловой стресс, биомаркер, продуктивность, удой, воспроизводство, термотолерантность, cattle, heat stress, biomarker, productivity, yield, reproduction, thermotolerance. Для анализа использовались материалы исследований, опубликованные в период с 1991 по 2025 годы. В обзоре обобщены современные данные о воздействии и оценке теплового стресса на крупный рогатый скот в условиях изменяющегося климата. Поиск проводился в международных и российских научных ресурсах. В итоговую выборку вошли 30 научных статей, отобранных по критериям релевантности: 24 публикации из зарубежных баз данных (PubMed, PubMed Central (PMC), Google Scholar, Web of Science) и 6 из российских источников (НЭБ eLibrary.ru и КиберЛенинка). Ключевые слова поиска включали термины, связанные с продуктивными, физиологическими, биохимическими и генетическими аспектами теплового стресса у сельскохозяйственных животных.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS**

Известно, что температура является одним из важных факторов окружающей среды, оказывающих влияние на здоровье и продуктивность сельскохозяйственных животных. Повышение глобальной температуры в условиях изменяющегося климата, влекущее за собой негативное воздействие теплового стресса на популяции скота, вызывает беспокойство у ученых и сельхозтоваропроизводителей в

различных климатических регионах [3, 4]. Крупный рогатый скот реагирует на повышение ТВИ, объединяющего показатели температуры и относительной влажности воздуха [5], вследствие чего изменяются физиологические, биохимические и молекулярные процессы в организме [6].

$$\text{ТВИ} = (0,8 \times T_c) + [(OB / 100) \times (T_c - 14,4)] + 46,4, \text{ где}$$

$T_c$  – температура сухого термометра, °С,  $OB$  – относительная влажность воздуха, %.

Снижение роста, продуктивности и репродуктивной эффективности у животных, подвергающихся тепловому стрессу, является результатом повышенного распределения энергии и питательных веществ в ответ на тепловой стресс [7]. Генетические механизмы термотолерантности требуют особого внимания [8].

Исследователями в качестве индикаторов термотолерантности крупного рогатого скота были предложены признаки, систематизированные по своему действию, проявляющиеся в период влияния теплового стресса:

1. Физиологические маркеры [9, 10]:

- повышаются температура тела и ректальная температура на 0,5–1,5°C при ТВИ >72, что свидетельствует о перегреве;

- возрастает частота дыхания с 30–40 до 60–100 дыхательных циклов в мин. из-за попыток организма усилить испарительное охлаждение;

- увеличивается частота сердцебиения на 15–30% (с 60–70 до 80–90 уд. /мин.), как реакция на стресс и гипоксию;

- усиливаются потоотделение и слюноотделение, но у крупного рогатого скота потоотделение менее эффективно, чем у других видов, что усугубляет тепловую нагрузку.

2. Поведенческие адаптации [4, 11]. Животные меняют поведение для минимизации тепловой нагрузки:

- снижается активность – коровы на 30–50% меньше двигаются, предпочитая лежать в тени;

- наблюдается поиск прохлады, стремление к вентиляции, поилкам

(водопоя), затененным зонам;

- падает потребление корма на 10–25% из-за угнетения аппетита и смещения кровотока от ЖКТ к коже;

- учащается питье – потребление воды возрастает на 20–40% для компенсации потерь жидкости.

3. Биохимические сдвиги [6, 12-15]:

- повышаются показатели лактата и пирувата на 15–30% из-за гипоксии и перехода на анаэробный гликолиз;

- возрастает концентрация кетоновых тел (ацетон, β-гидроксмасляная кислота) на 20–50% вследствие усиленного липолиза;

- повышается уровень мочевины, общего билирубина, аспартатаминотрансферазы и креатинфосфокиназы на 10-25% из-за деградации мышечных белков и снижения функции почек;

- увеличивается значение кортизола в 1,5–2 раза, вызывая гормональный дисбаланс (упомянутый в контексте изменений), что дополнительно ухудшает самочувствие животных, снижает иммунитет, нарушает мобилизацию энергии, что может влиять на синтез молока, нарушение полового цикла и др.

- снижаются уровни  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  из-за усиленного потоотделения, вследствие чего происходит электролитный дисбаланс.

4. Окислительный стресс [1, 16, 17]:

- ухудшается активность антиоксидантных ферментов (глутатионпероксидаза, каталаза, супероксиддисмутаза) на 20–40%, что ведет к накоплению свободных радикалов.

5. Молочная и мясная продуктивность [3, 18-20]:

- падает удой на 10–30% при ТВИ >66;

- снижается массовая доля жира в молоке на 0,2–0,5% из-за нарушения липидного обмена;

- изменяется жирнокислотный состав молока и мяса;

- уменьшается массовая доля белка в молоке на 0,1–0,3%;

- возрастает количество соматических клеток в молоке на 15–50% из-за сниже-

ния иммунитета;

- сокращаются среднесуточные приросты живой массы до 35% из-за снижения потребления корма;

- ухудшаются морфологический состав туш, органолептические и технологические показатели мяса животных.

6. Репродуктивные нарушения [10, 21]:

- ухудшается качество спермы у быков – снижается подвижность и концентрация сперматозоидов;

- падает оплодотворяемость коров на 20–30% из-за угнетения функции яичников;

- увеличиваются ранние эмбриональные потери в 1,5–2 раза из-за гипертермии и гормонального дисбаланса.

Определение термоустойчивых животных остается сложной задачей из-за комплексного характера реакции на тепловой стресс, поскольку показатели устойчивости к тепловому воздействию имеют высокую вариабельность, умеренную наследуемость и мало изучены. Особую сложность представляет антагонистическая взаимосвязь между термотолерантностью и продуктивными признаками дойных коров [22, 23]. Это означает, что традиционная селекция, направленная на повышение продуктивности, приводит к снижению способности животного к адаптации и преодолению теплового стресса [24].

Современные молекулярно-генетические исследования выявили сложную систему генетической регуляции ответа на тепловой стресс [7, 25]. Следовательно, при отборе молочного скота, выращиваемого в условиях потепления климата, следует учитывать генетическую изменчивость толерантности к тепловому стрессу.

Под воздействием повышенных температур в совокупности с высокой влажностью происходит значительная перестройка экспрессии генов, затрагивающих несколько физиологических систем организма животных.

Активируются гены белков теплового шока (HSP) и их транскрипционных фак-

торов (HSF), которые защищают белки от денатурации [7, 8, 26], тогда как экспрессия генов холодового ответа, напротив, подавляется [27].

Параллельно наблюдается индукция антиоксидантных генов, что отражает попытку организма противостоять окислительному стрессу [17].

Важные изменения происходят в иммунной системе, наблюдается угнетение активности генов цитокинов, вследствие чего снижается иммунная защита при стрессе [28].

Не менее значительные трансформации установлены в метаболических путях. Подавляются липогенетические гены, коррелирующие с изменениями содержания жира в молоке и его жирнокислотного состава [18, 29], тогда как активация генов глюконеогенеза, отражает попытку организма компенсировать энергодифицит и перераспределить ресурсы [30].

Для изучения генетических основ термотолерантности в современной селекции применяются передовые молекулярно-генетические подходы. Метод полногеномного ассоциативного анализа (GWAS) позволяет выявлять значимые SNP-маркеры, ассоциированные с устойчивостью к тепловому стрессу, и идентифицировать соответствующие локусы количественных признаков (QTL) [9, 18, 23]. Ученые в странах с субтропическим и тропическим жарким климатом (Индия, Таиланд, Бразилия, страны Африки и проч.) уже давно проводят исследования по поиску генов-маркеров у крупного рогатого скота, в основном молочного направления продуктивности, способного переносить повышенные температуры без потери продуктивных качеств [31–33]. Анализ данных проведенных научно-хозяйственных опытов указывает на то, что коровы аборигенных пород Мутуру, Н'Дама, Белый фулани и Зебу, а также Сахивал, Белый лампхун, Турецкий серый и др. обладают лучшей регуляцией реакции на тепловой стресс, чем помесный и чистокровный голштинский скот. [34–36]. В южных регионах, по сравнению с северными, зафиксировано боль-

шее количество SNP в локусах генов термотолерантности у различного поголовья животных, а также наблюдается увеличение частоты встречаемости их аллелей и генотипов. Многие из этих популяции являются мономорфными, что делает их привлекательными для использования в программах разведения по улучшению адаптивных качеств молочного скота.

Дополнительную информацию предоставляет ландшафтная геномика, которая анализирует адаптивный полиморфизм в контексте конкретных условий среды [37]. Эти методы открывают новые возможности для разработки эффективных программ селекции, учитывающих как продуктивные качества, так и стрессоустойчивость животных.

#### ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Проведенный анализ показал, что тепловой стресс и его последствия вызывают комплекс описанных нарушений, проявляющихся на различных уровнях, оказывают значительное влияние на экономическую эффективность молочной отрасли животноводства. Он негативно влияет на потребление корма, надой, скорость роста и репродуктивную функцию животных, а также ухудшает их здоровье и общее состояние.

Эти изменения приводят к значительным экономическим потерям в высокопродуктивном молочном животноводстве, особенно в условиях глобального изменения климата. Согласно современным данным, при ТВИ > 66 продуктивность животных может снижаться на 10-30%, а репродуктивная эффективность – на 20-30%. Для минимизации потерь в молочном скотоводстве необходимо:

Контролировать микроклимат в животноводческих помещениях (активные системы вентиляции, охлаждающие установки, доступ к воде).

Корректировать рационы (энергетические добавки, специальные витаминно-минеральные премиксы, антиоксиданты).

Совершенствовать селекционную работу (геномная селекция с учетом маркеров термотолерантности, методы

GWAS-анализа для идентификации ассоциированных SNP, мероприятия по разработке региональных программ разведения с акцентом на адаптивные качества).

#### TRAITS OF THERMOTOLERANCE IN CATTLE

**Safina N.Yu.** \* – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher (ORCID 0000-0003-1184-3188); **Mukhanina E.N.** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher (ORCID 0000-0001-9299-2104); **Shakirov Sh.K.** – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher (ORCID 0000-0002-3362-0463); **Gainutdinova E.R.** – Graduate student, Researcher (ORCID 0000-0002-2970-1500)

Tatar Scientific Research Institute of Agriculture "Kazan Scientific Center of Russia Academy of Sciences"

\*natysafina@gmail.com

**Financing:** *This paper is performed as part of the grant of the Tatarstan Academy of Sciences, provided to young candidates of sciences (postdoctoral fellows) for the purpose of defending their doctoral dissertation, conducting research, as well as performing their work duties in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan" (Contract No.78/2024-PD of December 16, 2024)*

#### ABSTRACT

The efficiency of livestock farming, especially dairy farming, in the context of global warming is determined by a complex of factors: climatic conditions (heat stress), feed base, physiological state of animals and their genetic adaptability. Elevated temperatures provoke complex disorders in cattle, including metabolic disorders and decreased productivity. Against the background of climate change, the impact of heat stress on cattle is a serious problem for animal husbandry. The objective of the review: to consider the signs of adaptive qualities and ther-



motolerance of cattle. In the context of climate change, heat stress in cattle is becoming a major concern for the livestock industry. Studies of domestic and foreign authors show that when the temperature-humidity index (THI) exceeds the threshold value (> 66), animals experience physiological disorders (increase in rectal temperature, increased respiration, etc.), behavioral changes (decreased activity, reduced feed intake, etc.), biochemical shifts (increased cortisol, increased ketone bodies, etc.), and biochemical changes (increased cortisol, increased ketone bodies, etc.).), biochemical shifts (increase in cortisol, increase in ketone bodies, etc.), decrease in productivity (decrease in milk yield, decrease in fat and protein mass fraction, change in fatty acid composition, decrease in live weight gain), deterioration of reproductive functions (decrease in fertilizability, and deterioration in sperm motility). Genetic studies have identified key markers of thermotolerance, including genes for heat shock proteins and factors (HSP and HSF), antioxidant enzymes, immunity and metabolism genes. However, selection is complicated by antagonism between productivity and stress tolerance. To minimize the consequences of negative effects of heat stress, it is recommended to control microclimate (ventilation, cooling) in livestock buildings, optimize feeding (introduction of antioxidant and vitamin supplements) and apply, along with traditional breeding methods, genetic selection using GWAS-analysis.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shoulah S.A. Histopathological changes and oxidative stress associated with Fascioliasis in bovines / S.A. Shoulah, M.M.S. Gaballa, M.M. Al-Assas et al. // *Tropical Animal Health and Production*. – 2024. – Vol. 56. – P. 48. DOI 10.1007/s11250-024-03896-1
2. Ullah M. Effect of heat stress on production performance in dairy animals / M. Ullah, M. Ibrahim, T. Hussain et al. // *Biol. Clin. Sci. Res. J.* - 2024: - Vol. 5(1). – P. 1078. DOI 10.54112/bcsrj.v2024i1.1078
3. Муханина Е.Н. Изучение негативного влияния теплового стресса на показатели молочной продуктивности коров при различных способах содержания / Е.Н. Муханина, Ш.К. Шакиров, Н.Ю. Сафина и др. // *Международный вестник ветеринарии*. – 2024. – № 4. – С. 509–517. DOI 10.52419/issn2072issn2072-2419.2024.4.509
4. Современные технологии в кормопроизводстве и животноводстве, проблемы и пути их решения (500 вопросов и ответов) : справочник / Ш.К. Шакиров, О.Л. Шайтанов, М.А. Сушенцова [и др.]. – 4-е издание, доработанное и дополненное. – Казань: Академия наук РТ, 2023. – 416 с. – ISBN 978-5-9690-1188-5
5. Mader T.L. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle / T.L. Mader, M.S. Davis, T. Brown-Brandl // *Journal of Animal Science*. – 2006. – Vol. 84(3). – P. 712–719. DOI: 10.2527/2006.843712x
6. Gujar G. Characterization of thermophysiological, haematological, and molecular changes in response to seasonal variations in two tropically adapted native cattle breeds of Bos indicus lineage in hot arid ambience of Thar Desert / G. Gujar, V.K. Choudhary, P. Vivek et al. // *Int J Biometeorol.* – 2022. – Vol. 66. – P. 1515–1529. DOI 10.1007/s00484-022-02293-3
7. Shaji S. Summer season related to heat and nutritional stresses on the adaptive capability of goats based on blood biochemical response and hepatic HSP70 gene expression / S. Shaji, V. Sejian, M. Bagath et al. // *Biol Rhythm Res.* – 2017. – VOL. 48. – P. 65–83. DOI 10.1080/09291016.2016.1232340
8. Сафина Н.Ю. Динамика молочной продуктивности и качественного состава молока коров различных генотипов гена Hsp70.1 на фоне теплового воздействия / Н.Ю. Сафина, Е.Н. Муханина, Э.Р. Гайнутдинова и др. // *Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Материалы XIII Международной научно-практической конференции, Владикавказ, 08–10 декабря 2023 года.* – Владикавказ: Веста, 2023. – С. 239–242.
9. Luo H. Weighted single-step GWAS and

- RNA sequencing reveals key candidate genes associated with physiological indicators of heat stress in Holstein cattle / H. Luo, L. Hu, L.F. Brito et al. // *J. Anim. Sci. Biotechnol.* – 2022. – Vol. 13. – Art. 108. DOI 0.1186/s40104-022-00748-6
10. Țogoe D., Mincă N.A. The Impact of Heat Stress on the Physiological, Productive, and Reproductive Status of Dairy Cows / D. Țogoe, N.A. Mincă // *Agriculture.* – 2024. – Vol. 14(8). – Art. 1241. DOI 10.3390/agriculture14081241
11. Passamonti M.M. The Quest for Genes Involved in Adaptation to Climate Change in Ruminant Livestock / M.M. Passamonti, E. Somenzi, M. Barbato et al. // *Animals.* – 2021. – Vol. 11. – Art. 2833. DOI 10.3390/ani11102833
12. Fujii N. Na(+)-K(+)-ATPase plays a major role in mediating cutaneous thermal hyperemia achieved by local skin heating to 39°C / N. Fujii, G.P. Kenny, T. Amano, et al. // *J Appl Physiol.* – 2021. – Vol. 131. – P. 1408–1416. DOI 10.1152/jappphysiol.00073.2021
13. Wang Z. Novel SNPs in the ATP1B2 gene and their associations with milk yield, milk composition and heat-resistance traits in Chinese Holstein cows / Z. Wang, G. Wang, J. Huang et al. // *Mol Biol Rep.* – 2011. – Vol. 38(3). – P. 1749–1755. DOI 10.1007/s11033-010-0289-6
14. Белоусов А.И. Влияние теплового стресса на коров в сухостойный и послеродовой период / А.И. Белоусов, И.А. Шкуратова, А.С. Красноперов и др. // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет).* – 2022. – № 3(64). – С. 93–101. DOI 10.31677/2072-6724-2022-64-3-93-101
15. Mylostyvyi R.V. Impact of heat stress on blood serum cortisol level in dairy cows / R.V. Mylostyvyi, M. Wrzecińska, M. Samardžija et al. // *Theoretical and Applied Veterinary Medicine.* – 2024. – Vol. 12(4). – P. 3–8. DOI 10.32819/2024.12016
16. Safina N. Polymorphism of the glutathioneperoxidase-1 gene (GPX-1 g. 189 T/C) and biochemical parameters of the blood serum of Holstein cattle / N. Safina, Sh. Shakirov, E. Gaynutdinova et al. // *E3s web of conferences.* – 2023. – Vol. 462. – P. 01018. DOI 10.1051/e3sconf/202346201018
17. Ighodaro O.M., Akinloye O.A. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid / O.M. Ighodaro, O.A. Akinloye // *Alexandria Journal of Medicine.* – 2018. – Vol. 54(4). – P. 287–293. DOI 10.1016/j.ajme.2017.09.001
18. Bohlouli M. Genome-wide associations for heat stress response suggest potential candidate genes underlying milk fatty acid composition in dairy cattle / M. Bohlouli, K. Halli, T. Yin et al. // *J. Dairy Sci.* – 2022. – Vol. 105. – P. 3323–3340. DOI 10.3168/jds.2021-21152
19. Brown-Brandl T.M. Analyses of thermoregulatory responses of feeder cattle exposed to simulated heat waves / T.M. Brown-Brandl, R.A. Eigenberg, G.L. Hahn et al. // *Int J Biometeorol.* – 2005. – Vol. 49(5). – P. 285–296. DOI 10.1007/s00484-004-0250-2
20. Chen X. Effects of heat stress on endocrine, thermoregulatory, and lactation capacity in heat-tolerant and -sensitive dry cows / X. Chen, C. Li, T. Fang et al. // *Front. Vet. Sci.* – 2024. – Vol. 11. – Art. 1405263. DOI 10.3389/fvets.2024.1405263
21. Dovolou E. Heat Stress: A Serious Disruptor of the Reproductive Physiology of Dairy Cows / E. Dovolou, T. Giannoulis, I. Nanas et al. // *Animals.* – 2023. – Vol. 13(11). – Art. 1846. DOI 10.3390/ani13111846
22. Carabaño M.J. The challenge of genetic selection for heat tolerance: the dairy cattle example / M.J. Carabaño // *Adv Anim Biosci.* – 2016. – Vol. 7. – P. 218–222. DOI 10.1017/s2040470016000169
23. Nguyen T.T.T. Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle / T.T.T. Nguyen, P.J. Bowman, M. Haile-Mariam et al. // *J Dairy Sci.* – 2016. – Vol. 99. – P. 2849–2862. DOI 10.3168/jds.2015-9685
24. Santana M.L. Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in Holsteins / M.L. Santana, A.B. Bignardi, R.J. Pereira et al. // *Animal.* – 2017. – Vol. 11. – P. 4–14. DOI 10.1017/S1751731116001725
25. Cuellar C.J. Differences in body tempera-

- ture regulation during heat stress and seasonal depression in milk yield between Holstein, Brown Swiss, and crossbred cows / C.J. Cuellar, M. Saleem, L.M. Jensen et al. // *J. Dairy Sci.* – 2023. – Vol. 106. – P. 3625–3632. DOI 10.3168/jds.2022-22725
26. Kishore A. Transcriptional Stability of Heat Shock Protein Genes and Cell Proliferation Rate Provides an Evidence of Superior Cellular Tolerance of Sahiwal (*Bos indicus*) Cow PBMCs to Summer Stress / A. Kishore, M. Sodhi, A. Sharma et al. // *Research & Reviews: Journal of Veterinary Sciences.* – 2016. – Vol. 2(1). – P. 33–40.
27. Юдин Н.С. Молекулярные маркеры адаптации к холодному климату у крупного рогатого скота / Н.С. Юдин, А.В. Игошин, Д.М. Ларкин // *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции.* – 2023. – № 9(1). – 5–14. DOI 10.18699/LettersVJ-2023-9-02
28. Rowinski J.R. Impact of an acute heat shock during in vitro maturation on interleukin 6 and its associated receptor component transcripts in bovine cumulus-oocyte complexes / J.R. Rowinski, L.A. Rispoli, R.R. Payton et al. // *J. Lannett Edwards Anim Reprod.* – 2021. – Vol. 17(4). – e20200221. DOI 10.1590/1984-3143-AR2020-0221
29. Safina N.Yu. Associations of the SCD1 gene SNP with fatty acids composition of Holstein cows / N.Yu. Safina, Sh.K. Shakirov, R.Kh. Ravilov et al. // *Bio web of conferences.* – 2020. – Vol. 27. – P. 00060. DOI 10.1051/bioconf/20202700060.
30. Wertheimer E. The ubiquitous glucose transporter GLUT-1 belongs to the glucose-regulated protein family of stress-inducible proteins / E. Wertheimer, S. Sasson, E. Cerasi et al. // *Proc Natl Acad Sci USA.* – 1991. – Vol. 88. – P. 2525–2529. DOI 10.1073/pnas.88.6.2525
31. Charoensook R. Polymorphisms in the bovine HSP90AB1 gene are associated with heat tolerance in Thai indigenous cattle / R. Charoensook, K. Gatphayak, A.R. Sharifi, et al. // *Trop Anim Health Prod.* – 2012. – Vol. 44. – P. 921–928. DOI 10.1007/s11250-011-9989-8
32. Prasanna Sai J. Association of SSCP Polymorphisms of HSP70 Gene with Physiological, Production and Reproduction Performance in Sahiwal and Crossbred Cows / J. Prasanna Sai, S.T. Rao Viroji, M. Prakash Gnana et al. // *Asian Journal of Dairy and Food Research.* – 2022. – Vol. 41(2). – P. 150–155. DOI 10.18805/ajdfr.DR-1796
33. De Campos J.S. Potentials of single nucleotide polymorphisms and genetic diversity studies at HSP90AB1 gene in Nigerian White Fulani, Muturu, and N'Dama cattle breeds / J.S. De Campos, G.O. Onasanya, A. Ubong et al. // *Trop Anim Health Prod.* – 2024. – Vol. 56. – Art. 58. DOI 10.1007/s11250-024-03909-z
34. Sajjanar B. Identification of SNP in HSP90AB1 and its Association with the Relative Thermotolerance and Milk Production Traits in Indian Dairy Cattle / B. Sajjanar, R. Deb, U. Singh et al. // *Animal Biotechnology.* – 2015. – Vol. 26(1). P. 45–50. DOI 10.1080/10495398.2014.882846
35. Sailo L.I.D. Association of single nucleotide polymorphism of Hsp90ab1 gene with thermotolerance and milk yield in Sahiwal cows / L.I.D. Sailo, A.V. Gupta, R. Das et al. // *African Journal of Biochemistry Research.* – 2015. – Vol. 9(8). – P. 99–103. DOI 10.5897/AJBR2015.0837
36. Atalay S., Kök S. The comparison of polymorphisms in the heat shock transcription factor 1 gene of Turkish grey cattle and Holstein cattle / S. Atalay, S. Kök // *Kafkas Univ Vet Fak Derg.* – 2023. – Vol. 29(5). – P. 429–435. DOI 10.9775/kvfd.2023.29256
37. Челомина Г.Н. Ландшафтная геномика (краткий обзор) / Г.Н. Челомина // *Биота и среда природных территорий.* – 2021. – № 4. – С. 122–134. DOI 10.37102/2782-1978\_2021\_4\_6

## REFERENCES

1. Shoulah S.A., Gaballa M.M.S., Al-Assas M.M., Saqr S.A., Gattan H.S., Selim A. Histopathological changes and oxidative stress associated with Fascioliasis in bovines // *Tropical Animal Health and Production.* 2024. 56:48 DOI 10.1007/s11250-024-03896-1
2. Ullah M., Ibrahim M., Hussain T., Ullah A., Hussain A., Sahin T., Ahmad S., Khan A.M.A., Sadiq A.B., Shah K.A. Effect of



- heat stress on production performance in dairy animals // *Biol. Clin. Sci. Res. J.* 2024. 1078. DOI <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2024i1.1078>
3. Mukhanina E.N., Shakirov Sh.K., Safina N.Yu., Gaynutdinova E.R. Study of the negative effect of heat stress on dairy productivity of cows under different housing methods // *International Bulletin of Veterinary Medicine*. 2024. 4:509–517. DOI 10.52419/issn2072issn2072-2419.2024.4.509
4. Shakirov Sh.K., Shajtanov O.L., Sushencova M.A. et al. Modern technologies in feed and animal production, problems and ways to solve them (500 questions and answers): reference book. 4th ed., revised and enlarged. Kazan: AN RT Publishing House. 2023: 426. ISBN 978-5-9690-1188-5
5. Mader T.L., Davis M.S., Brown-Brandl T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle // *Journal of Animal Science*. 2006. 84(3):712–719. DOI: 10.2527/2006.843712x
6. Gujar G., Choudhary V.K., Vivek P., Sodhi M., Choudhary M., Tiwari M., Masharing N., Mukesh M. Characterization of thermo-physiological, haematological, and molecular changes in response to seasonal variations in two tropically adapted native cattle breeds of Bos indicus lineage in hot arid ambience of Thar Desert // *Int J Biometeorol*. 2022. 66:1515–1529. DOI 10.1007/s00484-022-02293-3
7. Shaji S., Sejian V., Bagath M., Manjunathareddy G.B., Kurien E.K., Varma G., Bhatta R. Summer season related to heat and nutritional stresses on the adaptive capability of goats based on blood biochemical response and hepatic HSP70 gene expression // *Biol Rhythm Res*. 2017. 48:65–83. DOI 10.1080/09291016.2016.1232340
8. Safina N.Yu., Mukhanina E.N., Gaynutdinova E.R., Shakirov Sh.K. Dynamics on dairy productivity and milk quality in cattle with different genotypes by HSP70.1 gene under thermal impact // *Young scientists in solving urgent problems of science : Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, Vladikavkaz, Dec 08-10, 2023*. 239–242.
9. Luo H., Hu L., Brito L.F., Dou J., Sammad A., Chang Y., Ma L., Guo G., Liu L., Zhai L., Weighted single-step GWAS and RNA sequencing reveals key candidate genes associated with physiological indicators of heat stress in Holstein cattle // *J. Anim. Sci. Biotechnol*. 2022. 13:108. DOI 0.1186/s40104-022-00748-6
10. Țogoe D., Mincă N.A. The Impact of Heat Stress on the Physiological, Productive, and Reproductive Status of Dairy Cows. *Agriculture*. 2024. 14(8):1241. DOI 10.3390/agriculture14081241
11. Passamonti M.M., Somenzi E., Barbato M., Chillemi G., Colli L., Joost S, Milanese M., Negrini R., Santini M., Vajana E., Williams J.L., Ajmone-Marsan P. The Quest for Genes Involved in Adaptation to Climate Change in Ruminant Livestock // *Animals*. 2021. 11:2833. DOI 10.1152/japplphysiol.00073.2021
12. Fujii N., Kenny G.P., Amano T., Honda Y., Kondo N., Nishiyasu T. Na(+)-K(+)-ATPase plays a major role in mediating cutaneous thermal hyperemia achieved by local skin heating to 39°C // *J Appl Physiol*. 2021. 131:1408–1416. DOI 10.1152/japplphysiol.00073.2021
13. Wang Z., Wang G., Huang J., Li Q., Wang C., Zhong J. Novel SNPs in the ATP1B2 gene and their associations with milk yield, milk composition and heat-resistance traits in Chinese Holstein cows // *Mol Biol Rep*. 2011. 38(3):1749–1755. DOI 10.1007/s11033-010-0289-6
14. Belousov A.I., Shkuratova I.A., Krasnopetrov A.S., Oparina O.I., Malkov S.V. Influence of heat stress on cows during the dry and postpartum period. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022. (3):93–101. DOI 10.31677/2072-6724-2022-64-3-93-101
15. Mylostyvyi R.V., Wrzecińska M., Samardžija M., Gutj B.V., Yefimov V.H., Skliarov P.M. & Lieshchova M.O. Impact of heat stress on blood serum cortisol level in dairy cows // *Theoretical and Applied Veterinary Medicine*. 2024. 12(4):3–8. DOI 10.32819/2024.12016
16. Safina N., Shakirov Sh., Gaynutdinova E., Mukhanina E., Shayakhmetova L., Bagavieva E., Fattakhova Z., Akhmetov T.,

- Zagidullin L., Haertdinov R. Polymorphism of the glutathioneperoxidase-1 gene (GPX-1 g. 189 T/C) and biochemical parameters of the blood serum of Holstein cattle // E3s web of conferences. 2023. 462:01018. DOI 10.1051/e3sconf/202346201018
- 17.Ighodaro O.M., Akinloye O.A. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid // Alexandria Journal of Medicine. 2018. 54(4):287–293. DOI 10.1016/j.ajme.2017.09.001
- 18.Bohlouli M., Halli K., Yin T., Gengler N., König S. Genome-wide associations for heat stress response suggest potential candidate genes underlying milk fatty acid composition in dairy cattle // J. Dairy Sci. 2022. 105:3323–3340. DOI 10.3168/jds.2021-21152
- 19.Brown-Brandl T.M., Eigenberg R.A., Hahn G.L., Nienaber J.A., Mader T.L., Spiers D.E., Parkhurst A.M. Analyses of thermoregulatory responses of feeder cattle exposed to simulated heat waves // Int J Biometeorol. 2005. 49(5):285–296. DOI 10.1007/s00484-004-0250-2
- 20.Chen X., Li C., Fang T., Yao J. and Gu X. Effects of heat stress on endocrine, thermoregulatory, and lactation capacity in heat-tolerant and -sensitive dry cows // Front. Vet. Sci. 2024. 11:1405263. DOI 10.3389/fvets.2024.1405263
- 21.Dovolou E., Giannoulis T., Nanas I. and Georgios S. A. Heat Stress: A Serious Disruptor of the Reproductive Physiology of Dairy Cows // Animals. 2023. 13(11):1846. DOI 10.3390/ani13111846
- 22.Carabaño M.J. The challenge of genetic selection for heat tolerance: the dairy cattle example // Adv Anim Biosci. 2016. 7:218–222. DOI 10.1017/s2040470016000169
- 23.Nguyen T.T.T., Bowman P.J., Haile-Mariam M., Pryce J.E., Hayes B.J. Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle // J Dairy Sci. 2016. 99:2849–2862. DOI 10.3168/jds.2015-9685
- 24.Santana M.L., Bignardi A.B., Pereira R.J., Stefani G., El Faro L. Genetics of heat tolerance for milk yield and quality in Holsteins // Animal. 2017. 11:4–14. DOI 10.1017/S1751731116001725
- 25.Cuellar C.J., Saleem M., Jensen L.M., Hansen P.J. Differences in body temperature regulation during heat stress and seasonal depression in milk yield between Holstein, Brown Swiss, and crossbred cows // J. Dairy Sci. 2023. 106:3625–3632. DOI 10.3168/jds.2022-22725
- 26.Kishore A., Sodhi M., Sharma A., Shandilya U.K., Mohanty A., Verma P., Mann S., Mukes M. Transcriptional Stability of Heat Shock Protein Genes and Cell Proliferation Rate Provides an Evidence of Superior Cellular Tolerance of Sahiwal (Bos indicus) Cow PBMCs to Summer Stress // Research & Reviews: Journal of Veterinary Sciences. 2016. 2(1):33–40.
- 27.Yudin N.S., Igoshin A.V., Larkin D.M. Molecular markers of adaptation to the cold climate in cattle // Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2023. 9(1):5–14. DOI 10.18699/LettersVJ-2023-9-02
- 28.Rowinski J.R., Rispoli L.A., Payton R.R., Schneider L.G., Schrick F.N., McLean K.J. Impact of an acute heat shock during in vitro maturation on interleukin 6 and its associated receptor component transcripts in bovine cumulus-oocyte complexes // J. Lannett Edwards Anim Reprod. 2021. 17 (4):e20200221. DOI 10.1590/1984-3143-AR2020-0221
- 29.Safina N.Yu., Shakirov Sh.K., Ravilov R.Kh., Sharafutdinov G.S. Associations of the SCD1 gene SNP with fatty acids composition of Holstein cows // Bio web of conferences. 2020. 27:00060. DOI 10.1051/bioconf/20202700060.
- 30.Wertheimer E., Sasson S., Cerasi E., Ben Neriah Y. The ubiquitous glucose transporter GLUT-1 belongs to the glucose-regulated protein family of stress-inducible proteins // Proc Natl Acad Sci USA. 1991. 88:2525–2529. DOI 10.1073/pnas.88.6.2525
- 31.Charoensook R., Gatphayak K., Sharifi A.R., Chaisongkram Ch., Brenig B., Knorr Ch. Polymorphisms in the bovine HSP90AB1 gene are associated with heat tolerance in Thai indigenous cattle // Trop Anim Health Prod. 2012. 44:921–928. DOI 10.1007/s11250-011-9989-8
- 32.Prasanna Sai J., Rao Viroji S.T., Prakash

- Gnana M., Rathod Suresh, Kalyani P., Reddy Rajith B. Association of SSCP Polymorphisms of HSP70 Gene with Physiological, Production and Reproduction Performance in Sahiwal and Crossbred Cows // *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 2022. 41(2):150–155. DOI 10.18805/ajdfr.DR-1796
33. De Campos J.S., Onasanya G.O., Ubong A. Afolabi T.Y., Adeyemi S.A., Akinfolarin A.M., Christian O.I. Potentials of single nucleotide polymorphisms and genetic diversity studies at HSP90AB1 gene in Nigerian White Fulani, Muturu, and N'Dama cattle breeds // *Trop Anim Health Prod*. 2024. 56:58. DOI 10.1007/s11250-024-03909-z
34. Sajjanar B., Deb R., Singh U., Kumar S., Brahmane M., Nirmale A., Kumar Bal S., Minhas P.S. Identification of SNP in HSP90AB1 and its Association with the Relative Thermotolerance and Milk Production Traits in Indian Dairy Cattle // *Animal Biotechnology*. 2015. 26(1):45–50. DOI 10.1080/10495398.2014.882846
35. Sailo L.I.D., Gupta A.V., Das R., Chaudhari M.V. Association of single nucleotide polymorphism of Hsp90ab1 gene with thermotolerance and milk yield in Sahiwal cows // *African Journal of Biochemistry Research*. 2015. 9(8):99–103. DOI 10.5897/AJBR2015.0837
36. Atalay S, Kök S: The comparison of polymorphisms in the heat shock transcription factor 1 gene of Turkish grey cattle and Holstein cattle // *Kafkas Univ Vet Fak Derg*. 2023. 29(5):429–435. DOI 10.9775/kvfd.2023.29256
37. Chelomina G.N. Landscape genomics (short review) // *Biota and Environment of Natural Areas*. 2021. 4:122-134. DOI 10.37102/2782-1978\_2021\_4\_6