

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432)

EDN: [GLOWAJ](https://www.edn.ru/GLOWAJ)

УДК 636.2.082:612.015.1:612.453.9

Original article



Влияние уровня адреналина на мясную продуктивность и качество мяса бычков абердин-ангусской породы при определении его содержания в волосе

А.Н. Фролов¹, О.А. Завьялов¹, З.А. Галиева^{1,2}

¹ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН, Оренбург, Российская Федерация

²БашГАУ, Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Интенсификация современного животноводства неизбежно приводит к усилению стрессовой нагрузки на организм животных, что негативно сказывается на их продуктивности и качестве продукции. Существующие методы оценки стрессового состояния по биологическим жидкостям (кровь, слюна) обладают существенным недостатком - они отражают лишь кратковременные гормональные колебания. В этой связи особую актуальность приобретает поиск надежных интегральных показателей хронического стресса, среди которых перспективным представляется определение концентрации адреналина в волосе.

Цель. Изучить влияние уровня адреналина оцененного по волосу на мясную продуктивность, качество мяса и минеральный обмен у бычков абердин-ангусской породы.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 50 бычках абердин-ангусской породы. Концентрацию адреналина определяли методом иммуноферментного анализа в образцах волос, отобранных с холки животных. На основании полученных данных процентильным методом сформированы три экспериментальные группы: I - с низким (1,24-1,55 нг/мл), II - с умеренным (1,58-2,69 нг/мл) и III - с высоким (2,76-3,14 нг/мл) уровнем гормона. После проведения контрольного убоя выполнена комплексная оценка убойных показателей, морфологического состава туш, химического анализа и определение минерального профиля длиннейшей мышцы спины. Статистическая обработка данных проведена с использованием пакета программ Statistica 10.0.

Результаты. Установлено, что повышенный уровень адреналина ассоциирован со снижением массы парной туши на 5,8%, убойной массы - на 6,0%. При ухудшении качественных характеристик говядины: содержание внутримышечного жира снижалось на 18%, энергетическая ценность - на 11%, концентрация кальция - на 22%, калия - на 31%, цинка - на 18%, селена - на 28%.

Концентрация адреналина в волосе может служить репрезентативным биомаркером хронического стресса, оказывающего существенное влияние на продуктивность и качественные характеристики мяса.

Ключевые слова: мясное скотоводство; бычки; откорм; мясная продуктивность; волос; гормоны; стресс; адреналин

Для цитирования. Фролов, А. Н., Завьялов, О. А., & Галиева, З. А. (2026). Влияние уровня адреналина на мясную продуктивность и качество мяса бычков абердин-ангусской породы при определении его содержания в волосе. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 60–82. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432>

The influence of adrenaline level on meat productivity and meat quality of Aberdeen Angus bulls based on its determination in hair

A.N. Frolov¹, O.A. Zavyalov¹, Z.A. Galieva^{1,2}

¹FSSI FRC BST RAS, Orenburg, Russian Federation

²BashSAU, Ufa, Russian Federation

Abstract

Background. The intensification of modern animal husbandry inevitably leads to increased stress load on animals, which negatively affects their productivity and product quality. Existing methods for assessing stress status using biological fluids (blood, saliva) have a significant drawback - they reflect only short-term hormonal fluctuations. In this regard, the search for reliable integral indicators of chronic stress becomes particularly relevant, among which the determination of adrenaline concentration in hair appears promising.

Purpose. To study the effect of adrenaline levels assessed in hair on meat productivity, meat quality and mineral metabolism in Aberdeen Angus bulls.

Materials and methods. The study was performed on 50 Aberdeen Angus bulls. Adrenaline concentration was determined by enzyme immunoassay in hair samples collected from the animals' withers. Based on the data obtained, three experimental groups were formed by the percentile method: I - with low (1.24-1.55 ng/ml), II - with

moderate (1.58-2.69 ng/ml) and III - with high (2.76-3.14 ng/ml) hormone levels. After control slaughter, a comprehensive assessment of slaughter indicators, morphological composition of carcasses, chemical analysis and determination of the mineral profile of the longissimus dorsi muscle was performed. Statistical data processing was performed using the Statistica 10.0 software package.

Results. It was found that elevated adrenaline levels were associated with a decrease in hot carcass weight by 5.8% and slaughter weight by 6.0%. With deterioration of beef quality characteristics: intramuscular fat content decreased by 18%, energy value by 11%, calcium concentration by 22%, potassium by 31%, zinc by 18%, selenium by 28%.

Adrenaline concentration in hair can serve as a representative biomarker of chronic stress that significantly affects productivity and meat quality characteristics.

Keywords: beef cattle farming; bulls; fattening; meat productivity; hair; hormones; stress; adrenaline

For citation. Frolov, A. N., Zavyalov, O. A., & Galieva, Z. A. (2026). The influence of adrenaline level on meat productivity and meat quality of Aberdeen Angus bulls based on its determination in hair. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 60–82. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1432>

Введение

В условиях глобализации сельского хозяйства и растущего спроса на высококачественную мясную продукцию проблема хронического стресса у сельскохозяйственных животных выходит на первый план. Интенсификация животноводства, сопровождающаяся изменением условий содержания, транспортировкой, ветеринарными обработками и другими технологическими воздействиями, приводит к длительному на организм животных воздействию стресс-факторов. Хронический стресс не только снижает благополучие крупного рогатого скота, но и негативно влияет на ключевые показатели продуктивности, включая прирост живой массы, конверсию корма и качественные характеристики мяса [10, p. 95; 18, p. 26].

В связи с этим разработка надежных и объективных методов оценки стрессовой нагрузки приобретает особую значимость для современного животноводства. Традиционно уровень стресса оценивают по концентрации гормонов кортизола и адреналина в крови, слюне или моче [13, p. 3]. Однако эти методы имеют существенные ограничения: они отражают лишь кратковременные гормональные изменения и сильно зависят от времени взятия проб, условий транспортировки и даже индивидуальной реакции животного на процедуру забора биоматериала [47, p. 591; 51, p. 1060-61]. В результате полученные данные не всегда позволяют достовер-

но оценить кумулятивное воздействие стрессоров на организм в течение продолжительного периода. В последние годы в качестве перспективной альтернативы для долгосрочного мониторинга стресса активно исследуется волосяной покров животных [2, р. 19]. Гормоны стресса, включая адреналин, способны накапливаться в волосах в процессе их роста, что позволяет ретроспективно анализировать уровень стрессовой нагрузки за несколько недель или даже месяцев [19, р. 13]. Этот метод уже успешно применяется в исследованиях на людях и лабораторных животных, однако его валидация для сельскохозяйственных видов, особенно мясного скота, остается недостаточно изученной [37, р. 104383]. Особый интерес представляет изучение адреналина как маркера хронического стресса у бычков специализированных мясных пород, таких как абердин-ангусская. Эта порода широко используется в мясном скотоводстве благодаря высокой скороспелости, выраженной мраморности мяса и адаптивным качествам [5, р. 953; 38, р. 1124]. Однако, согласно исследованиям, животные мясных пород могут быть более чувствительны к стрессу по сравнению с молочными, что потенциально влияет на их продуктивность и качество мяса [16, р. 3644]. В частности, хроническая активация симпатoadреналовой системы способна изменять метаболические процессы в мышечной ткани, что может отражаться на таких ключевых параметрах, как активность ферментов протеолиза (кальпаинов и катепсинов), влияющих на нежность мяса [24, р. 36; 56, р. 109652], соотношение быстрых и медленных мышечных волокон, определяющее текстуру и сочность продукта [22, р. 830, 26, р. 3], окислительно-восстановительный баланс, связанный с сохранностью мяса при хранении [49, р. 182], а также водосвязывающую способность, влияющую на потери при термической обработке [21, р. 523]. Несмотря на растущий интерес к использованию волос в качестве биоматериала, многие аспекты остаются малоизученными. В частности, недостаточно данных о методологии анализа – отсутствуют унифицированные протоколы экстракции и детекции адреналина из волосяного покрова крупного рогатого скота [43, р. 349; 46, р. 73], корреляция с продуктивностью – не установлены четкие взаимосвязи между уровнем адреналина в волосе и показателями мясной продуктивности [40, р. 579], породных особенностях – влияние генетических факторов на накопление катехоламинов [7, р. 452; 48, р. 3084], а также отсутствуют нормативные значения для оценки степени стрессовой нагрузки [29, р. 100437]. Проведение данного исследования позволит не только восполнить эти пробелы, но и разработать практические рекомендации для животноводческих предприятий. Внедрение

метода анализа адреналина в волосе может стать важным инструментом для объективной оценки уровня хронического стресса у крупного рогатого скота, прогнозирования качества мясной продукции на ранних этапах откорма, оптимизации технологий содержания с учетом поведенческих и физиологических особенностей животных, а также повышения рентабельности производства за счет снижения потерь, связанных со стресс-индуцированным снижением продуктивности. Таким образом, данная работа вносит вклад как в фундаментальные аспекты физиологии стресса у сельскохозяйственных животных, так и в развитие практических решений для современного мясного скотоводства.

Цель исследования – изучение влияния уровня адреналина, оцененного по его концентрации в волосе на мясную продуктивность и качество мяса бычков абердин-ангусской породы.

Материалы и методы

Исследование выполнено в ИП КФХ Набоян К.А. (Кинельский район, Самарская область) на бычках абердин-ангусской породы ($n=50$) в возрасте 18 месяцев, от которых перед убоем произведен отбор волос для определения в нем концентрации адреналина. На основании полученных данных животных распределили на три группы: I группа ($n=14$): концентрация адреналина ≤ 25 -го перцентиля; II группа ($n=19$): 25-75-й перцентили; III группа ($n=17$): ≥ 75 -го перцентиля. Основанием выбора данных интервалов послужили ранее проведенные исследования [35, р. 459].

Бычки в период заключительного откорма (15-18 мес.) получали полностью смешанный рацион, который раздавали трижды в сутки. Кормовая смесь включала 60 % концентратов (дроблёная кукуруза, ячмень, пшеница, рожь и премикс) и 40 % грубых и сочных кормов (сено разнотравное, суданской травы и сенаж люцерны). Условия кормления и содержания в процессе заключительного откорма (15-18 месяцев) были идентичными для всех обследованных животных и соответствовали рекомендуемым нормам кормления скота [1, с. 170]. Реализация предлагаемых методов и подходов, заявленных в исследовании, осуществлялась с использованием приборной базы центра коллективного пользования ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург и убойного пункта хозяйства.

Оценка убойных показателей и отбор средних проб мяса. Убой животных осуществляли по достижении ими 18-месячного возраста с последующей классификацией туш согласно действующим стандартам

(ГОСТ 34120-2017). Для лабораторных анализов отбирали пробы мышечной ткани: из каждой левой полутуши после суточного охлаждения при температуре 2-4°C, весом: 400 г мясного фарша (средняя проба) и 200 г длиннейшей мышцы спины (участок между 9-11 ребрами). Лабораторные исследования включали: определение содержания влаги и сухих веществ (ГОСТ 33319-2015), количественного содержания белка (ГОСТ 25011-2017), уровень жира (ГОСТ 23042-2015), содержание золы (ГОСТ 31727-2012), на основании которых производили расчет энергетической ценности. Дополнительно в длиннейшей мышце спины проводили измерение водородного показателя (рН) и влагоудерживающей способности.

Методика определения уровня адреналина. Отбор проб волос проводили однократно перед убоем животных, забирая материал с верхней части холки (минимальная навеска 0,4 г) [34, р. 633]. Для стрижки использовали профессиональную машинку Heiniger Saphir (Швейцария) с металлическими ножами, устанавливая высоту среза 1,5 мм. Во избежание контаминации лезвия перед каждым отбором проб обрабатывали 96 %-ным этанолом. Все манипуляции выполняли в одноразовых перчатках Elegreen TPE из винилтеплогового каучука, срезая волосы максимально близко к коже. Образцы помещали в сухие бумажные конверты и хранили в затемнённом месте при комнатной температуре до начала анализа. Очистку проб осуществляли по следующему протоколу: замачивание в дистиллированной воде при 40-60°C в течение 3 ч, двухчасовая ультразвуковая обработка в 40 % этаноле (частота 35 кГц, мощность 300 (450) Вт, амплитуда 10 мм), затем аналогичная по параметрам обработка в бидистиллированной воде. Очищенные образцы измельчали в вибрационной мельнице IMC vMILL05 со стальным размольным узлом до достижения медианного размера частиц (d_{50}) 20 мкм. Экстракцию гормонов проводили по модифицированной методике, ранее апробированной для исследований на человеке и приматах [33, р. 50882]. Концентрацию гормона в образцах определяли с помощью иммуноферментного анализа на микропланшетном анализаторе Infinite F200 PRO («Tecan», Австрия), используя ИФА набор Bovine Epinephrine/Adrenaline, EPI ELISA Kit со следующими характеристиками: диапазон обнаружения: 0,1–100 нг/мл, чувствительность: 0,1 нг/мл, объем исследуемого образца: 50–100 мкл, длина волны детекции: 450 нм (Cusabio Technology LLC, Ltd).

При проведении лабораторных анализов также использовали хроматограф газовый Кристалл-4000 Люкс (СКБ «Хроматэк», Россия), систему капиллярного электрофореза капель 105 (ООО «Люмэкс-Маркетинг»,

Россия), экстрактор Сокслета (Полтавский завод медицинского стекла, Украина), гомогенизатор TissueLyser LT («Qiagen N.V.», Германия), центрифугу Min-iSpin («Eppendorf», Германия). Все измерения проводились с соблюдением стандартных методик и требований к лабораторным исследованиям.

Статистический анализ. Обработку данных проводили с помощью программного обеспечения Statistica 10.0 (разработка «StatSoft, Inc.», США). Для определения достоверности различий применяли t-критерий Стьюдента, при этом порог статистической значимости устанавливали на уровне $p \leq 0,05$. Результаты представлены в виде средних величин (M) с указанием стандартной ошибки среднего ($\pm SEM$).»

Результаты и обсуждение

Проведенный сравнительный анализ кумулятивной концентрации адреналина в волосяном покрове бычков экспериментальных групп выявил статистически значимые межгрупповые различия (рис. 1).

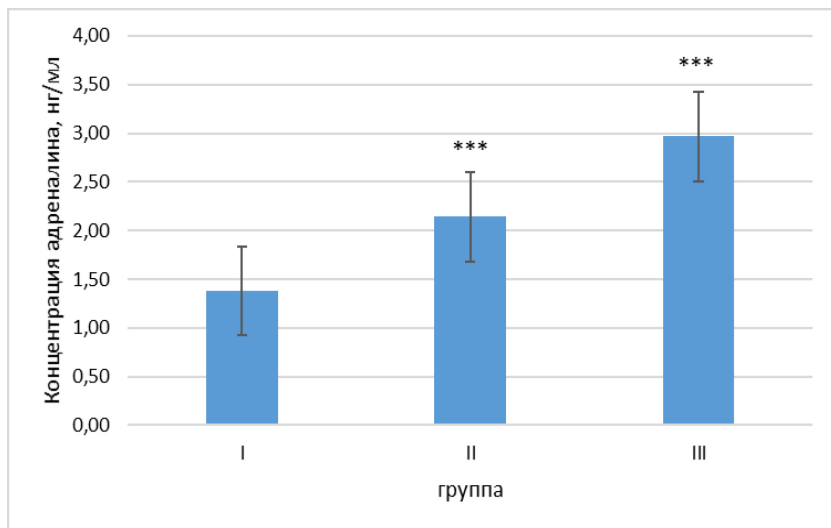


Рис. 1. Концентрация адреналина в волосе бычков абердин-ангусской породы в разрезе сформированных групп, нг/мл

*, **, *** Соответственно $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,001$ по сравнению с I группой.

Fig. 1. Adrenaline concentration in the hair of Aberdeen-Angus bulls, broken down by treatment group, ng/mL

*, **, *** $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$, and $p \leq 0,001$, respectively, compared with Group I.

Наибольшие показатели зафиксированы в III группе, где среднее содержание адреналина составило $2,966 \pm 0,125$ нг/мл. Проведенный дисперсионный анализ подтвердил высокую достоверность различий между группами: показатели III группы превышали значения I на 114,91 % ($p \leq 0,001$), а II - на 38,60 % ($p \leq 0,01$). Детальный анализ индивидуальной вариабельности показал следующие диапазоны концентраций: в I группе минимальные значения находились в интервале 1,242-1,546 нг/мл, во II группе диапазон составлял 1,578-2,691 нг/мл, в III группе зафиксирован максимальный разброс показателей - 2,755-3,137 нг/мл. Полученные данные свидетельствуют о выраженной гетерогенности стрессовой нагрузки у животных разных групп. Узкий диапазон вариабельности в I группе (0,304 нг/мл) указывает на относительную однородность адреналинового статуса этих животных, в то время как широкий разброс значений в III группе (0,382 нг/мл) отражает индивидуальные различия в реакции на стресс-факторы. Особого внимания заслуживает прогрессивный характер увеличения концентрации адреналина от I к III группе, что коррелирует с интенсивностью воздействия стрессовых факторов в условиях эксперимента. Статистическая значимость различий ($p \leq 0,001$ -0,01) подтверждает репрезентативность полученных данных и позволяет рассматривать уровень адреналина в волосе в качестве надежного биомаркера хронического стресса. Выявленные межгрупповые различия могут быть обусловлены различной чувствительностью симпато-адреналовой системы животных к стрессовым воздействиям, а также индивидуальными особенностями метаболизма катехоламинов.

Концентрация адреналина в волосе достоверно повлияла на все основные убойные показатели бычков во всех опытных группах (табл. 1).

По мере увеличения уровня адреналина в волосе происходило снижение убойных показателей. Так, бычки I группы превосходили сверстников II и III по предубойной массе на 2,55 ($P \leq 0,05$) и 4,20 % ($P \leq 0,01$), массе парной туши – на 3,72 ($P \leq 0,05$) и 5,84 % ($P \leq 0,001$), массе внутреннего жира – на 3,45 ($P \leq 0,05$) и 7,69 % ($P \leq 0,01$), убойной массе – на 3,70 ($P \leq 0,01$) и 5,95% ($P \leq 0,001$) соответственно. Снижение мясной продуктивности при стрессе согласуется с данными других исследований. Известно, что адреналин, выделяющийся в ответ на стресс, активирует катаболические процессы, усиливая распад мышечного гликогена и угнетая синтез белка [25, р. 1293]. Это объясняет уменьшение массы туши и убойного выхода у животных с повышенным уровнем адреналина. Кроме того, стрессовые факторы, такие как погодные условия, ранговые взаимоотношения, преду-

бойное содержание, способствуют снижению жираотложения [11, р. 14], это связано с мобилизацией энергетических резервов, включая активизацию липазы и процесса расщепления триглицеридов [17, р. 252]. Полученные межгрупповые различия по убойной массе, также могут быть связаны с изменением гидратации мышечной ткани под воздействием адреналина [54, р. 172].

Таблица 1.

Результаты контрольного убоя подопытных бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 1. Results of the control slaughter of Aberdeen-Angus bull calves, by hair adrenaline concentration ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Предубойная живая масса, кг	527,36 $\pm$ 4,8 ^{ab}	514,26 $\pm$ 4,65	506,10 $\pm$ 4,32
Масса парной туши, кг	301,48 $\pm$ 2,92 ^{ab}	290,67 $\pm$ 2,81	284,84 $\pm$ 2,53
Выход туши, %	57,17 $\pm$ 0,314 ^b	56,52 $\pm$ 0,317	56,28 $\pm$ 0,309
Масса внутреннего жира-сырца, кг	19,47 $\pm$ 0,232 ^{ab}	18,82 $\pm$ 0,227 ^c	18,08 $\pm$ 0,208
Выход внутреннего жира-сырца, %	3,69 $\pm$ 0,172	3,66 $\pm$ 0,162	3,57 $\pm$ 0,128
Убойная масса, кг	320,95 $\pm$ 2,27 ^{ab}	309,49 $\pm$ 2,08 ^c	302,92 $\pm$ 1,87
Убойный выход, %	60,86 $\pm$ 0,42	60,18 $\pm$ 0,37	59,85 $\pm$ 0,35

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Морфологический состав туш, установленный методом обвалки, продемонстрировал зависимость мясных качеств от уровня адреналина, ретроспективно определенного в волосяном покрове (табл. 2).

Анализ полученных данных выявил превосходство I группы по массе охлажденной туши на 3,90 ($P \leq 0,05$) и 5,84 % ($P \leq 0,001$), массе мякоти – на 4,23 ($P \leq 0,05$) и 6,78 % ($P \leq 0,01$), при снижении массы костей – на 2,06 и 3,39 % ($P \leq 0,05$) по сравнению со II и III группами соответственно. Эти результаты согласуются с данными Zhao G, (2022) [55, р. 108664], которые установили, что повышенный уровень адреналина ускоряет гликогенолиз в мышечной ткани, приводя к снижению массы туши. Полученные нами данные о снижении массы костей в группах с высоким адреналином подтверждают выводы о катаболическом действии адреналина на костную ткань [23, р. 442]. Адреналин индуцирует окислительный стресс в мышечной ткани, что проявляется в снижении выхода мякоти [20, р. 686]. Кроме того, полученные нами результаты подтверждают выводы о негативном

влиянии повышенного уровня катехоламинов на мясную продуктивность [28, р. 252]. Механизм наблюдаемых изменений может быть объяснен активацией β -адренорецепторов под действием эпинефрина, что приводит к мобилизации энергетических ресурсов и подавлению анаболических процессов [44, р. 329].

Таблица 2.

Морфологический состав туш бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 2. Morphological composition of Aberdeen Angus bull carcasses, depending on the concentration of adrenaline in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the Research Institute of the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Масса охлажденной туши, кг	297,54 $\pm$ 3,042 ^{ab}	286,39 $\pm$ 3,062	281,12 $\pm$ 3,026
Масса мякоти, кг	239,86 $\pm$ 3,056 ^{ab}	230,12 $\pm$ 3,038	224,62 $\pm$ 3,038
Выход мякоти, %	80,61 $\pm$ 0,248 ^b	80,35 $\pm$ 0,248	79,90 $\pm$ 0,234
Масса костей, кг	47,58 $\pm$ 0,372 ^b	46,76 $\pm$ 0,334	46,53 $\pm$ 0,324
Выход костей, %	15,99 $\pm$ 0,152 ^b	16,33 $\pm$ 0,142	16,55 $\pm$ 0,136
Масса сухожилий и связок, кг	10,10 $\pm$ 1,748	9,51 $\pm$ 1,782	9,97 $\pm$ 1,732
Выход сухожилий и связок, %	3,39 $\pm$ 0,234	3,32 $\pm$ 0,234	3,55 $\pm$ 0,232
Индекс мясности	5,04 $\pm$ 0,122	4,92 $\pm$ 0,126	4,83 $\pm$ 0,122
Показатель пищевой ценности	4,47 $\pm$ 0,106	4,36 $\pm$ 0,108	4,28 $\pm$ 0,096

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Биохимический состав мышечной ткани служит ключевым диагностическим критерием качества мяса, отражая его физиологическую зрелость, энергетическую ценность и эффективность конверсии питательных веществ корма в условиях различного адреналинового статуса организма (табл. 3).

В мякоти туш бычков I группы больше содержалось сухого вещества – на 0,15 и 0,75 % ($P \leq 0,05$), жира – на 0,23 и 0,9 % ($P \leq 0,05$), синтезировано в мякоти жира – на 6,10 ($P \leq 0,001$) и 14,66 % ($P \leq 0,001$), увеличилась и энергетическая ценность мякоти туши – на 5,14 ($P \leq 0,01$) и 11,07 % ($P \leq 0,001$). Полученные нами данные свидетельствуют о том, что низкие уровни адреналина способствует более эффективному липогенезу и накоплению энергетических ресурсов в мышечной ткани [9, р. 11]. Выявленные различия в химическом составе мякоти туш связаны по нашему мнению с тем, что адреналин, как ключевой гормон симпатoadреналовой системы, оказывает

влияние на мобилизацию энергетических субстратов [36, p. 70]. При хронически повышенном уровне адреналина усиливается липолиз, проявляющийся в снижении депонирования жира в тканях [3, p. 2500]. В то же время у животных с более низкой концентрацией адреналина преобладают анаболические процессы, что способствует увеличению содержания жира и энергетической ценности мяса.

Таблица 3.

Химический состав и энергетическая ценность мякоти туш бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе (M±m, n = 50, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 3. Chemical composition and energy value of the carcass meat of Aberdeen Angus bulls, depending on the concentration of adrenaline in the hair (M±m, n = 50, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	33,1±0,156 ^b	32,95±0,168 ^c	32,35±0,136
Протеин, %	18,98±0,21	19,08±0,202	19,14±0,198
Жир, %	13,11±0,186 ^b	12,88±0,182	12,21±0,172
Зола, %	1,01±0,062	0,99±0,07	1,0±0,068
Синтезировано в мякоти, кг:			
протеина	45,53±1,192	43,91±1,167	42,99±1,093
жира	31,45±0,278 ^{ab}	29,64±0,302 ^c	27,43±0,296
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	8,36±0,134	8,29±0,172	8,04±0,184
Энергетическая ценность мякоти туши, МДж	2005,9±18,08 ^{ab}	1907,8±17,96 ^c	1805,9±17,58

Примечание: ^a - P£0,05 – II группа по сравнению с I; ^b - P£0,05 – III группа по сравнению с I; ^c - P£0,05 – III группа по сравнению со II.

Влияние уровня адреналина (определенного в волосе) на аккумуляцию интрамускульного жира оценивали посредством анализа химического состава длиннейшей мышцы спины у бычков абердин-ангусской породы (табл. 4).

Поведенный анализ выявил достоверные различия в концентрации адреналина в волосе между группами бычков, что оказало значимое влияние на биохимический состав длиннейшей мышцы спины (m. longissimus dorsi). У животных I группы с минимальным уровнем адреналина (1,242-1,546 нг/мл) отмечено наибольшее содержание внутримышечного жира (на 0,35-0,4% выше, P£0,05) и триптофана (на 3,74-6,31% выше, P£0,05-0,01) в мышечной ткани. Эти результаты коррелируют с данными Park et

al. (2018) [39, p. 1044], которые установили обратную зависимость между концентрацией катехоламинов и интенсивностью липогенеза в скелетных мышцах. Повышенное содержание триптофана может свидетельствовать об изменении протеолитических процессов, что подтверждается исследованиями Martin et al. (2014) [31, p. 4206], связавшими уровень этой аминокислоты с водосвязывающей способностью мышечных белков. Бычки III группы с максимальной концентрацией адреналина характеризовались достоверно меньшим содержанием жира (на 0,10-0,29 %, $P \leq 0,05$) и более высоким уровнем белка (на 0,47-0,82 %, $P \leq 0,01$) в мышечной ткани по сравнению с другими группами. По-видимому, это связано с активирующим влиянием адреналина на протеинкиназу А и последующее усиление протеосинтеза [53, p. 58]. Кроме того, обнаруженные изменения в составе мышечной ткани могут быть связаны с адреналин-индуцированной модуляцией гидратации миофибриллярных белков [27, p. 1115; 52, p. 540].

Таблица 4.

Химический состав и энергетическая ценность длиннейшей мышцы спины бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойн К.А.)

Table 4. Chemical composition and energy value of the longissimus dorsi muscle of Aberdeen Angus bulls, depending on the concentration of adrenaline in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Сухое вещество, %	24,82 $\pm$ 0,158	24,51 $\pm$ 0,140	24,4 $\pm$ 0,142
Протеин, %	21,63 $\pm$ 0,142	21,68 $\pm$ 0,204	21,62 $\pm$ 0,132
Жир, %	2,19 $\pm$ 0,121 ^b	1,84 $\pm$ 0,142	1,79 $\pm$ 0,136
Зола, %	1,00 $\pm$ 0,081	0,99 $\pm$ 0,078	0,99 $\pm$ 0,074
Энергетическая ценность 1 кг мякоти, МДж	4,57 $\pm$ 0,094	4,44 $\pm$ 0,76	4,41 $\pm$ 0,082
Триптофан, мг/%	376,71 $\pm$ 3,65 ^{ab}	363,12 $\pm$ 2,94 ^c	354,36 $\pm$ 3,38
Оксипролин, мг/%	54,90 $\pm$ 0,58	55,18 $\pm$ 0,52	55,48 $\pm$ 0,48
pH	5,46 $\pm$ 0,098	5,52 $\pm$ 0,108	5,72 $\pm$ 0,104
Влагоёмкость, %	55,22 $\pm$ 0,356	54,78 $\pm$ 0,344	54,48 $\pm$ 0,308
БКП	6,9 $\pm$ 0,120 ^b	6,6 $\pm$ 0,118	6,4 $\pm$ 0,112

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Результаты исследования устанавливают прямую связь между кумулятивной концентрацией адреналина в волосе, отражающей хронический стресс, и

изменением элементного состава мышечной ткани. Повышение уровня адреналина коррелирует со значительными сдвигами в содержании основных минералов, что указывает на нарушение физиологического статуса животных и может служить диагностическим критерием скрытого стресса (Табл.5).

Таблица 5.

Содержание химических элементов в длиннейшей мышце спины бычков абердин-ангусской породы, в зависимости от концентрации адреналина в волосе ($M \pm m$, $n = 50$, опыт в условиях ИП КФХ Набойан К.А.)

Table 5. Chemical element content in the longest back muscle of Aberdeen-Angus bulls, as a function of adrenaline concentration in the hair ($M \pm m$, $n = 50$, experiment conducted at the K.A. Naboyan Farm)

Показатель	Группа		
	I	II	III
Макроэлементы			
Ca	364,2 $\pm$ 11,14 ^{ab}	310,5 $\pm$ 14,59	284,6 $\pm$ 11,93
K	17602 $\pm$ 390,5 ^{ab}	13451 $\pm$ 321,2	13440 $\pm$ 471,3
Mg	1125 $\pm$ 26,7 ^b	1158 $\pm$ 22,7 ^c	928 $\pm$ 29,1
Na	2812 $\pm$ 24,4 ^a	3109 $\pm$ 35,4 ^c	2785 $\pm$ 40,5
P	8114 $\pm$ 343,3 ^a	9336 $\pm$ 318,0 ^c	7960 $\pm$ 576,3
Эссенциальные микроэлементы			
Fe	219,9 $\pm$ 19,3	186,3 $\pm$ 18,2	183,9 $\pm$ 30,4
Zn	240,6 $\pm$ 2,33 ^{ab}	221,6 $\pm$ 3,40 ^c	197,3 $\pm$ 4,28
Co	0,024 $\pm$ 0,003	0,023 $\pm$ 0,005	0,021 $\pm$ 0,004
Cr	2,11 $\pm$ 0,285	2,19 $\pm$ 0,345	1,99 $\pm$ 0,543
Cu	3,06 $\pm$ 0,027 ^b	3,08 $\pm$ 0,043 ^c	2,92 $\pm$ 0,043
I	0,408 $\pm$ 0,025 ^b	0,373 $\pm$ 0,033	0,284 $\pm$ 0,036
Mn	1,01 $\pm$ 0,122	0,93 $\pm$ 0,216	0,83 $\pm$ 0,281
Se	0,878 $\pm$ 0,051 ^b	0,848 $\pm$ 0,043 ^c	0,629 $\pm$ 0,060
Условно-эссенциальные микроэлементы			
B	1,52 $\pm$ 0,076	1,63 $\pm$ 0,093	1,52 $\pm$ 0,056
Ni	4,32 $\pm$ 0,231 ^b	4,83 $\pm$ 0,189 ^c	3,03 $\pm$ 0,396
As	0,019 $\pm$ 0,003 ^{ab}	0,031 $\pm$ 0,004	0,039 $\pm$ 0,007
Токсичные микроэлементы			
Al	27,5 $\pm$ 2,90	31,8 $\pm$ 3,62	24,8 $\pm$ 7,58
Cd	0,0030 $\pm$ 0,0004	0,0034 $\pm$ 0,0002	0,0037 $\pm$ 0,0002
Pb	0,045 $\pm$ 0,0112 ^{ab}	0,095 $\pm$ 0,0144	0,075 $\pm$ 0,0086
Sr	0,389 $\pm$ 0,050	0,459 $\pm$ 0,0741	0,473 $\pm$ 0,0824

Примечание: ^a - $P \leq 0,05$ – II группа по сравнению с I; ^b - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению с I; ^c - $P \leq 0,05$ – III группа по сравнению со II.

Установленные закономерности свидетельствуют о комплексном влиянии хронического стресса на метаболизм макро- и микроэлементов в мышечной ткани. Наблюдается достоверное снижение концентрации кальция в мышечной ткани по мере увеличения уровня адреналина: в III группе показатель был на 21,8 % ниже, чем в I ($p \leq 0,05$). Это может быть связано с активацией кальций-зависимых протеолитических ферментов калпаиновой системы под воздействием хронического стресса [45, р. 733]. Аналогичная тенденция отмечена для калия, содержание которого в I группе было на 30,9 % выше, чем в II и III группах ($p \leq 0,05$), что свидетельствует о нарушении электролитного баланса и функции Na^+/K^+ -АТФазы при повышенной адреналиновой нагрузке [6, р. 1270]. Достоверные изменения наблюдались также в содержании магния, натрия и фосфора. Повышенный уровень магния во II группе ($1158 \pm 22,7$ мг/кг) по сравнению с III ($928 \pm 29,1$ мг/кг; $p \leq 0,05$) может отражать компенсаторные механизмы поддержания мембранного потенциала клеток [45, р. 52]. Динамика содержания фосфора демонстрирует его увеличение во II группе с последующим снижением в III, что коррелирует с изменениями энергетического метаболизма в условиях стресса [4, р. 519]. Среди эссенциальных микроэлементов наиболее выраженные изменения отмечены для цинка, содержание которого последовательно снижалось от $240,6 \pm 2,33$ мг/кг в I группе до $197,3 \pm 4,28$ мг/кг в III ($p \leq 0,05$). Поскольку цинк является кофактором более 300 ферментов, его дефицит может существенно влиять на антиоксидантный статус мышечной ткани [41, р. 94]. Аналогичная тенденция наблюдалась для селена (снижение на 28,4 % в III группе по сравнению с I; $p \leq 0,05$) и йода (снижение на 30,4%), что свидетельствует об угнетении антиоксидантной защиты при хроническом стрессе [42, р. 1257]. Интересные изменения отмечены для условно-эссенциальных элементов. Содержание никеля увеличивалось во II группе ($4,83 \pm 0,189$ мг/кг) с последующим резким снижением в группе III ($3,03 \pm 0,396$ мг/кг; $p \leq 0,05$), что может отражать перераспределение этого элемента между тканями при длительном стрессе [8, р. 36]. Концентрация мышьяка прогрессивно увеличивалась от $0,019 \pm 0,003$ мг/кг в I группе до $0,039 \pm 0,007$ мг/кг в III ($p \leq 0,05$), что требует дополнительного изучения возможных механизмов его аккумуляции. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий в содержании алюминия, кадмия и стронция, отмечена тенденция к увеличению концентрации кадмия в III группе. Содержание свинца было максимальным в группе II ($0,095 \pm 0,0144$ мг/кг), превышая показатель группы I в 2,1 раза ($p \leq 0,05$), что может быть связано с изменением проницаемости биологических барьеров при стрессе [12, р. 55]. Выявленные изменения

минерального состава могут быть объяснены несколькими физиологическими механизмами. Во-первых, хронический стресс приводит к активации симпато-адреналовой системы и повышению проницаемости клеточных мембран [14, p. 1034]. Во-вторых, изменяется распределение элементов между внутри- и внеклеточными пространствами вследствие нарушения работы ионных насосов [32, p. 877]. В-третьих, модулируется активность металл-связывающих белков и транспортных систем [30, p. 119]. Особого внимания заслуживает корреляция между уровнем адреналина и содержанием элементов, участвующих в антиоксидантной защите (Zn, Se, Cu). Их прогрессирующее снижение в группах с более высоким адреналиновым статусом свидетельствует об истощении компенсаторных механизмов при хроническом стрессе [49, p. 183]. Полученные данные имеют важное значение для разработки методов коррекции минерального обмена у животных, подвергающихся хроническому стрессу. Результаты свидетельствуют о необходимости включения в рационы дополнительных источников цинка, селена и других микроэлементов для поддержания антиоксидантного статуса и качества мяса [50, p. 71].

Полученные результаты имеют важное практическое значение для мясного скотоводства, так как позволяют прогнозировать качественные характеристики говядины на основе показателей адреналиновой активности. Для более глубокого понимания выявленных закономерностей перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение молекулярных механизмов влияния адреналина на экспрессию ключевых липогенных генов (PPAR γ , FASN) и оценка комплексного воздействия других стресс-гормонов на метаболизм мышечной ткани.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что определение концентрации адреналина в волосяном покрове представляет собой репрезентативный метод оценки хронического стресса у крупного рогатого скота. Полученные данные демонстрируют статистически значимое негативное влияние повышенного уровня адреналина на основные показатели мясной продуктивности и качественные характеристики говядины. Выявленные закономерности свидетельствуют о существенных нарушениях метаболических процессов при длительном воздействии стресс-факторов. Результаты исследования подтверждают перспективность использования адреналинового статуса в качестве диагностического критерия при оценке благополучия животных и прогнозировании качества продукции.

Заключение комитета по этике. 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. Методика проведения эксперимента была одобрена Этическим комитетом ФНЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 11.03.2024 г.).

Информированное согласие. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 24-16-00093

Список литературы / References

1. Калашников, А. П., Фисинин, В. И., Щеглов, В. В., & Первов, Н. Г. (2003). *Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных*. Знание. 456 с. (Kalashnikov, A. P., Fisinin, V. I., Shcheglov, V. V., & Pervov, N. G. (2003). *Norms and rations for feeding farm animals*. Znanie. 456 p.). ISBN: 5-94587-093-5. EDN: <https://elibrary.ru/PXQMHL>
2. Baier, F., Grandin, T., Engle, T., & Edwards-Callaway, L. (2019). Evaluation of hair characteristics and animal age on the impact of hair cortisol concentration in feedlot steers. *Frontiers in Veterinary Science*, 6, 323. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00323>
3. Bergen, W. G., & Mersmann, H. J. (2005). Comparative aspects of lipid metabolism: impact on contemporary research and use of animal models. *The Journal of Nutrition*, 135(11), 2499–2502. <https://doi.org/10.1093/jn/135.11.2499>
4. Berridge, M. J., Bootman, M. D., & Roderick, H. L. (2003). Calcium signalling: dynamics, homeostasis and remodelling. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 4(7), 517–529. <https://doi.org/10.1038/nrm1155>. EDN: <https://elibrary.ru/YKQCKT>
5. Chung, K. Y., Lee, S. H., Cho, S. H., Kwon, E. G., & Lee, J. H. (2018). Current situation and future prospects for beef production in South Korea — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(7), 951–960. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0187>

6. Clausen, T. (2003). $\text{Na}^+\text{-K}^+$ pump regulation and skeletal muscle contractility. *Physiological Reviews*, 83(4), 1269–1324. <https://doi.org/10.1152/physrev.00011.2003>. EDN: <https://elibrary.ru/KZASUN>
7. Cooke, A. S., Mullan, S., Morten, C., Hockenhull, J., Le Grice, P., Le Cocq, K., Lee, M. R. F., Cardenas, L. M., & Rivero, M. J. (2023). Comparison of the welfare of beef cattle in housed and grazing systems: hormones, health, and behaviour. *The Journal of Agricultural Science*, 161(3), 450–463. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000357>. EDN: <https://elibrary.ru/GTJYEB>
8. Denkhaus, E., & Salnikow, K. (2002). Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 42(1), 35–56. [https://doi.org/10.1016/s1040-8428\(01\)00214-1](https://doi.org/10.1016/s1040-8428(01)00214-1). EDN: <https://elibrary.ru/YKJJBX>
9. Dunshea, F. R., D'Souza, D. N., Pethick, D. W., Harper, G. S., & Warner, R. D. (2005). Effects of dietary factors and other metabolic modifiers on quality and nutritional value of meat. *Meat Science*, 71(1), 8–38. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.05.001>
10. EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW), Nielsen, S. S., Alvarez, J., Boklund, A., Dippel, S., Dorea, F., Figuerola, J., Herskin, M. S., Michel, V., Miranda Chueca, M. Á., Nannoni, E., Nonno, R., Riber, A. B., Stahl, K., Stegeman, J. A., Thulke, H. H., Tuytens, F., Cozzi, G., Knierim, U., ... Winckler, C. (2025). Welfare of beef cattle. *EFSA Journal*, 23(7), e9518. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9518>. EDN: <https://elibrary.ru/TPQBDK>
11. Ferguson, D. M., & Warner, R. D. (2008). Have we underestimated the impact of pre-slaughter stress on meat quality in ruminants? *Meat Science*, 80(1), 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.004>
12. Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: A review with recent updates. *Interdisciplinary Toxicology*, 5(2), 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
13. García-Torres, S., Cabeza de Vaca, M., Tejerina, D., Romero-Fernández, M. P., Ortiz, A., Franco, D., Sentandreu, M. A., & Oliván, M. (2021). Assessment of stress by serum biomarkers in calves and their relationship to ultimate pH as an indicator of meat quality. *Animals*, 11(8), 2291. <https://doi.org/10.3390/ani11082291>. EDN: <https://elibrary.ru/XIAHJS>
14. Goldstein, D. S. (2010). Adrenal responses to stress. *Cellular and Molecular Neurobiology*, 30(8), 1433–1440. <https://doi.org/10.1007/s10571-010-9606-9>. EDN: <https://elibrary.ru/LFKZSI>
15. Goll, D. E., Thompson, V. F., Li, H., Wei, W., & Cong, J. (2003). The calpain system. *Physiological Reviews*, 83(3), 731–801. <https://doi.org/10.1152/physrev.00029.2002>. EDN: <https://elibrary.ru/LWZUZV>

16. González, L. A., Schwartzkopf-Genswein, K. S., Bryan, M., Silasi, R., & Brown, F. (2012). Relationships between transport conditions and welfare outcomes during commercial long haul transport of cattle in North America. *Journal of Animal Science*, 90(10), 3640–3651. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4796>
17. Grandin, T. (1997). Assessment of stress during handling and transport. *Journal of Animal Science*, 75(1), 249–257. <https://doi.org/10.2527/1997.751249x>. EDN: <https://elibrary.ru/YAUYYKC>
18. Grandin, T. (2016). Evaluation of the welfare of cattle housed in outdoor feedlot pens. *Veterinary and Animal Science*, 1–2, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2016.11.001>
19. Heimbürge, S., Kanitz, E., & Otten, W. (2019). The use of hair cortisol for the assessment of stress in animals. *General and Comparative Endocrinology*, 270, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2018.09.016>
20. Holmes, J. H., Ashmore, C. R., & Robinson, D. W. (1973). Effects of stress on cattle with hereditary muscular hypertrophy. *Journal of Animal Science*, 36(4), 684–694. <https://doi.org/10.2527/jas1973.364684x>
21. Hughes, J. M., Oiseth, S. K., Purslow, P. P., & Warner, R. D. (2014). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 98(3), 520–532. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.022>
22. Joo, S. T., Kim, G. D., Hwang, Y. H., & Ryu, Y. C. (2013). Control of fresh meat quality through manipulation of muscle fiber characteristics. *Meat Science*, 95(4), 828–836. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.044>
23. Kikuchi, K., Yamada, T., & Sugi, H. (2009). Effects of adrenaline on glycogenolysis in resting anaerobic frog muscles studied by ^{31}P -NMR. *The Journal of Physiological Sciences*, 59(6), 439–446. <https://doi.org/10.1007/s12576-009-0054-6>
24. Koohmaraie, M., & Geesink, G. H. (2006). Contribution of postmortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. *Meat Science*, 74(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.025>
25. Koolhaas, J. M., Bartolomucci, A., Buwalda, B., de Boer, S. F., Flügge, G., Korte, S. M., Meerlo, P., Murison, R., Olivier, B., Palanza, P., Richter-Levin, G., Sgoifo, A., Steimer, T., Stiedl, O., van Dijk, G., Wöhr, M., & Fuchs, E. (2011). Stress revisited: a critical evaluation of the stress concept. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(5), 1291–1301. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.02.003>
26. Listrat, A., Lebre, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., Picard, B., & Bugeon, J. (2016). How muscle structure and composition influence meat and flesh quality. *The Scientific World Journal*, 2016, 3182746. <https://doi.org/10.1155/2016/3182746>

27. Loerch, S. C., & Fluharty, F. L. (1999). Physiological changes and digestive capabilities of newly received feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, 77(5), 1113–1119. <https://doi.org/10.2527/1999.7751113x>
28. Lowe, T. E., Devine, C. E., Wells, R. W., & Lynch, L. L. (2004). The relationship between postmortem urinary catecholamines, meat ultimate pH, and shear force in bulls and cows. *Meat Science*, 67(2), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.10.013>
29. Mackey, S. J., Cooke, R. F., de Souza, I. S., & Pickett, A. T. (2025). Effects of administering the maternal bovine appeasing substance on growth performance, cortisol level and carcass characteristics of finishing feedlot cattle. *Veterinary and Animal Science*, 29, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100457>. EDN: <https://elibrary.ru/URFWXX>
30. Maret, W. (2010). Metalloproteomics, metalloproteomes, and the annotation of metalloproteins. *Metallomics*, 2(2), 117–125. <https://doi.org/10.1039/b915804a>
31. Martin, J. N., Garmyn, A. J., Miller, M. F., Hodgen, J. M., Pfeiffer, K. D., Thomas, C. L., Rathmann, R. J., Yates, D. A., Hutcheson, J. P., & Brooks, J. C. (2014). Comparative effects of beta-adrenergic agonist supplementation on the yield and quality attributes of selected subprimals from calf-fed Holstein steers. *Journal of Animal Science*, 92(9), 4204–4216. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7881>
32. McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation: central role of the brain. *Physiological Reviews*, 87(3), 873–904. <https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2006>. EDN: <https://elibrary.ru/MJUBNT>
33. Meyer, J., Novak, M., Hamel, A., & Rosenberg, K. (2014). Extraction and analysis of cortisol from human and monkey hair. *Journal of Visualized Experiments*, 83, e50882. <https://doi.org/10.3791/50882>
34. Miroshnikov, S., Kharlamov, A., Zavyalov, O., Frolov, A., Bolodurina, I., Arapova, O., & Duskaev, G. (2015). Method of sampling beef cattle hair for assessment of elemental profile. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14(9), 632–636. <https://doi.org/10.3923/pjn.2015.632.636>. EDN: <https://elibrary.ru/UZXNBR>
35. Miroshnikov, S., Zavyalov, O., Frolov, A., Bolodurina, I., Skalny, A., Kalashnikov, V., Grabeklis, A., & Tinkov, A. (2017). The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos Taurus*). *Biological Trace Element Research*, 180(1), 456–462. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0991-5>. EDN: <https://elibrary.ru/XNCEKI>
36. Möstl, E., & Palme, R. (2002). Hormones as indicators of stress. *Domestic Animal Endocrinology*, 23(1–2), 67–74. [https://doi.org/10.1016/s0739-7240\(02\)00146-7](https://doi.org/10.1016/s0739-7240(02)00146-7)
37. Mustonen, P., Karlsson, L., Kataja, E. L., Scheinin, N. M., Kortessluoma, S., Coimbra, B., Rodrigues, A. J., Sousa, N., & Karlsson, H. (2019). Maternal prenatal hair

- cortisol is associated with prenatal depressive symptom trajectories. *Psychoneuroendocrinology*, 109, 104383. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2019.104383>
38. Papaleo Mazzucco, J., Goszczynski, D. E., Ripoli, M. V., Melucci, L. M., Pardo, A. M., Colatto, E., Rogberg-Muñoz, A., Mezzadra, C. A., Depetris, G. J., Giovambattista, G., & Villarreal, E. L. (2016). Growth, carcass and meat quality traits in beef from Angus, Hereford and cross-breed grazing steers, and their association with SNPs in genes related to fat deposition metabolism. *Meat Science*, 114, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.12.018>
39. Park, S. J., Beak, S. H., Jung, D. J. S., Kim, S. Y., Jeong, I. H., Piao, M. Y., Kang, H. J., Fassah, D. M., Na, S. W., Yoo, S. P., & Baik, M. (2018). Genetic, management, and nutritional factors affecting intramuscular fat deposition in beef cattle — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(7), 1043–1061. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0310>
40. Pochigaeva, K., Druzhkova, T., Yakovlev, A., Onufriev, M., Grishkina, M., Chepelev, A., Guekht, A., & Gulyaeva, N. (2017). Hair cortisol as a marker of hypothalamic-pituitary-adrenal axis activity in female patients with major depressive disorder. *Metabolic Brain Disease*, 32(2), 577–583. <https://doi.org/10.1007/s11011-017-9952-0>. EDN: <https://elibrary.ru/YUWJQX>
41. Prasad, A. S. (1995). Zinc: an overview. *Nutrition*, 11(1 Suppl), 93–99.
42. Rayman, M. P. (2012). Selenium and human health. *The Lancet*, 379(9822), 1256–1268. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61452-9)
43. Reid, J., Parker, K., Clemens, L., & Bristow, M. (2021). Validity and reliability of method used to analyse hair cortisol concentration. *F1000Research*, 10, 349. <https://doi.org/10.12688/f1000research.28187.1>. EDN: <https://elibrary.ru/OJGEJZ>
44. Robinson, M. M., Bell, C., Peelor, F. F., 3rd, & Miller, B. F. (2011). β -Adrenergic receptor blockade blunts postexercise skeletal muscle mitochondrial protein synthesis rates in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 301(2), R327–R334. <https://doi.org/10.1152/ajp-regu.00160.2011>
45. Romani, A. M. (2013). Magnesium in health and disease. In A. Sigel, H. Sigel, & R. K. O. Sigel (Eds.), *Interrelations between essential metal ions and human diseases* (pp. 49–79). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_3
46. Russell, E., Kirschbaum, C., Laudenslager, M. L., Stalder, T., de Rijke, Y., van Rossum, E. F., Van Uum, S., & Koren, G. (2015). Toward standardization of hair cortisol measurement: results of the first international interlaboratory round robin. *Therapeutic Drug Monitoring*, 37(1), 71–75. <https://doi.org/10.1097/FTD.0000000000000148>
47. Russell, E., Koren, G., Rieder, M., & Van Uum, S. (2012). Hair cortisol as a biological marker of chronic stress: current status, future directions and unanswered

- questions. *Psychoneuroendocrinology*, 37(5), 589–601. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.09.009>
48. Schmidt, S. E., Neuendorff, D. A., Riley, D. G., Vann, R. C., Willard, S. T., Welsh, T. H., Jr, & Randel, R. D. (2014). Genetic parameters of three methods of temperament evaluation of Brahman calves. *Journal of Animal Science*, 92(7), 3082–3087. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7494>
49. Sies, H. (2015). Oxidative stress: a concept in redox biology and medicine. *Redox Biology*, 4, 180–183. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2015.01.002>. EDN: <https://elibrary.ru/UPRKFH>
50. Spears, J. W., & Weiss, W. P. (2008). Role of antioxidants and trace elements in health and immunity of transition dairy cows. *The Veterinary Journal*, 176(1), 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.015>
51. Tallo-Parra, O., Manteca, X., Sabes-Alsina, M., Carbajal, A., & Lopez-Bejar, M. (2015). Hair cortisol detection in dairy cattle by using EIA: protocol validation and correlation with faecal cortisol metabolites. *Animal*, 9(6), 1059–1064. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000294>
52. Wahrenberg, H., Bolinder, J., & Arner, P. (1991). Adrenergic regulation of lipolysis in human fat cells during exercise. *European Journal of Clinical Investigation*, 21(5), 534–541. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2362.1991.tb01406.x>
53. Walker, C. E., & Drouillard, J. (2012). Effects of catecholamines on gut microflora and potential for beta-adrenergic agonists to impact ruminal fermentation. *The Open Agriculture Journal*, 6, 57–66. <https://doi.org/10.2174/1874331501206010057>
54. Warriss, P. D. (2003). Optimal lairage times and conditions for slaughter pigs: a review. *The Veterinary Record*, 153(6), 170–176. <https://doi.org/10.1136/vr.153.6.170>
55. Zhao, G., Bai, X., Tian, W., Ru, A., Li, J., Wang, H., Wang, K., Xiao, K., Zhu, C., & Li, H. (2022). The effect of shower time, electrolyte treatment, and electrical stimulation on meat quality of cattle longissimus thoracis muscle in cold weather. *Meat Science*, 184, 108664. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108664>. EDN: <https://elibrary.ru/KEMFKP>
56. Zhao, Y., Xiang, C., Roy, B. C., Bruce, H. L., Blecker, C., Zhang, Y., Liu, C., Zhang, D., Chen, L., & Huang, C. (2025). Apoptosis and its role in postmortem meat tenderness: A comprehensive review. *Meat Science*, 219, 109652. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109652>. EDN: <https://elibrary.ru/ANIUDY>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Фролов Алексей Николаевич, доктор биологических наук, заведующий отделом технологии мясного скотоводства и производства говядины

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»

*ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
forleh@mail.ru*

Завьялов Олег Александрович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»

*ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация
oleg-zavyalov83@mail.ru*

Галиева Зулфия Асхатовна, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины; доцент

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук»; ФГБОУ ВО «Бакирский государственный аграрный университет»

*ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Республика Башкортостан, Российская Федерация
zulfia2704@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksey N. Frolov, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Beef Cattle Breeding and Beef Production Technology

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences

*29, 9 Janvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation
forleh@mail.ru*

SPIN-code: 8129-5450

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

Scopus AuthorID: 56714917700

ResearcherID: H-7679-2017

Oleg A. Zavyalov, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Department of Beef Cattle Breeding and Beef Production Technology

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences

29, 9 Janvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation

oleg-zavyalov83@mail.ru

SPIN-code: 6946-7296

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

Scopus AuthorID: 56823498900

ResearcherID: N-4454-2014

Zulfiya A. Galieva, Candidate of Agricultural Sciences, Researcher of the Department of Beef Cattle Breeding and Beef Production Technology; Associate Professor

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education "Bashkir State Agrarian University"

29, 9 Janvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 34, 50-letiya Oktyabrya Str., Ufa, 450001, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

zulfia2704@mail.ru

SPIN-code: 5315-9065

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6588-3316>

Поступила 21.08.2025

После рецензирования 22.09.2025

Принята 30.09.2025

Received 21.08.2025

Revised 22.09.2025

Accepted 30.09.2025