

## ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РОСТА РЕМОНТНЫХ ТЁЛОК ОТ ИХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ ВО ВНУТРИУТРОБНЫЙ ПЕРИОД\*

В. А. Сафонов<sup>1</sup>, доктор биологических наук, Т. С. Ермилова<sup>1</sup>, аспирант,  
А. Е. Черницкий<sup>2</sup>, доктор биологических наук

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук,  
119991, Москва, ул. Косыгина, 19

E-mail: safrus2003@mail.ru

<sup>2</sup>Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения  
Российской академии наук,

620142, Екатеринбург, ул. Белинского, 112а

E-mail: cherae@mail.ru

Согласно гипотезе DoHaD (англ. «developmental origins of health and disease») – происхождение здоровья и болезней, связанное с развитием), условия внутриутробного развития оказывают долгосрочное влияние на постнатальный рост и здоровье животных. Целью исследований было определение связи между обеспеченностью плода микроэлементами в последние 3 месяца внутриутробного развития и показателями интенсивности их роста в первые 180 дней после рождения. Объектом исследований служили 40 клинически здоровых тёлки симментальской породы. Образцы покровных непигментированных волос из кисти хвоста у новорожденных отбирали перед 1-м кормлением молозивом. Содержание микроэлементов (селена, меди, цинка, марганца, кобальта, железа, хрома и молибдена) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Nexion 300D, Perkin Elmer, США). Массу тёлки измеряли в 1-е сутки жизни и в возрасте 180 дней, после чего рассчитывали среднесуточный прирост. Связи между исследуемыми показателями выявляли с использованием критерия Спирмана в программе IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp., США). Достоверных связей между массой новорожденных телят и содержанием микроэлементов в образцах их волос не установлено. Масса тёлки в возрасте 180 дней и ее среднесуточный прирост (в первые 180 дней жизни) коррелировали с содержанием в образцах волос новорожденных селена ( $r = 0,349$  и  $r = 0,408$  при  $p < 0,05$  соответственно), меди ( $r = 0,378$  и  $r = 0,440$  при  $p < 0,01$  соответственно), цинка ( $r = 0,455$  и  $r = 0,481$  при  $p < 0,01$  соответственно) и кобальта ( $r = 0,304$  и  $r = 0,344$  при  $p < 0,05$ , соответственно). Для марганца, железа, хрома и молибдена таких связей не установлено.

## GROWTH RATE DEPENDENCE ON MICRONUTRIENT PROVISION IN REPLACEMENT HEIFERS DURING THE INTRAUTERINE PERIOD

V. A. Safonov<sup>1</sup>, T. E. Ermilova<sup>1</sup>, A. E. Chernitskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences,  
119991, Moskva, ul. Kosygina, 19

E-mail: safrus2003@mail.ru

<sup>2</sup>Ural Federal Agrarian Scientific Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
620142, Yekaterinburg, ul. Belinskogo, 112a

E-mail: cherae@mail.ru

According to the developmental origins of health and disease (DoHaD) hypothesis, the conditions during intrauterine development have a long-term effect on postnatal growth and animal health. This study aimed to determine the relationship between fetal micronutrient provision in the last three months of intrauterine development and growth intensity indicators in the first 180 days after birth. This study focused on 40 clinically healthy Simmental heifers. Samples of non-pigmented tail hair were collected from newborns before their first colostrum feeding. The micronutrient content (selenium, copper, zinc, manganese, cobalt, iron, chromium, and molybdenum) was analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (Nexion 300D, Perkin Elmer, USA). Calf weight was measured on the first day of life and at 180 days, and average daily weight gain was calculated. The relationships between the variables were analyzed using Spearman's rank correlation coefficient in IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp., USA). No significant correlations were found between the weights of the newborn calves and the micronutrient content in their hair samples. However, at 180 days of age, calf weight and average daily weight gain (in the first 180 days of life) correlated with the selenium ( $r = 0.349$  and  $r = 0.408$ ,  $p < 0.05$ , respectively), copper ( $r = 0.378$  and  $r = 0.440$ ,  $p < 0.01$ , respectively), zinc ( $r = 0.455$  and  $r = 0.481$ ,  $p < 0.01$ , respectively), and cobalt ( $r = 0.304$  and  $r = 0.344$ ,  $p < 0.05$ , respectively) contents in the hair samples of newborns. No correlations were found for manganese, iron, chromium, and molybdenum.

**Ключевые слова:** микроэлементы, постнатальный рост, крупный рогатый скот, ремонтные тёлки.

**Key words:** trace elements, postnatal growth, cattle, replacement heifers.

Согласно гипотезе DoHaD (англ. «developmental origins of health and disease») – происхождение здоровья и болезней, связанное с развитием) [1], условия внутриутробного развития оказывают долгосрочное влияние на постнатальный рост и здоровье человека и животных [2, 3]. Траектория внутриутробного и постнатально-

го развития организма контролируется материнским питанием, либо непосредственно, путем обеспечения формирующегося эмбриона и плода необходимыми макро- и микронутриентами, либо опосредованно, через регуляцию плацентарной функции [4] или изменение эпигенетических механизмов [5].

\*исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23–26–00136).

В отличие от таких макроэлементов, как белки, жиры и углеводы, влияние которых на программирование геномной функции и развитие эмбриона и плода довольно полно изучено за последние годы [6, 7], эпигенетические последствия внутриутробного дефицита микроэлементов исследованы недостаточно [5].

Известно, что ограничение микроэlementного питания в критические периоды развития плода оказывает негативное влияние на формирование мышечной и жировой ткани, эндокринную регуляцию, а также на продолжительность жизни после рождения [6, 8, 9]. Результаты недавних исследований показали, что внутриутробный дефицит микроэлементов у крупного рогатого скота служит фактором риска ряда заболеваний [10, 11] и метаболических нарушений в постнатальном онтогенезе [3, 12], что негативно сказывается на росте и продуктивности животных [2, 3]. Это следует учитывать при выращивании ремонтных тёлочек и планировании воспроизводства стада.

В последнем триместре беременности у коров происходит наиболее активный рост плода, масса которого увеличивается в 2,56...4,85 раза [13]. При такой высокой скорости роста плод особенно остро нуждается в адекватном поступлении энергии, аминокислот, витаминов, макро- и микроэлементов [3, 5, 7]. Считаю, что внутриутробный запас микроэлементов, необходимых для нормального формирования и развития плода у крупного рогатого скота, полностью определяет уровень потребления и обеспеченности ими материнского организма [3, 5, 11]. Более того, недостаточное потребление эссенциальных микроэлементов матерью может приводить к избыточному накоплению плодом потенциально токсичных и токсичных химических элементов, вызывая глубокие нарушения микроэлементного гомеостаза [3, 11, 14].

Одним из способов оценить уровень микроэлементного питания плода в последнем триместре беременности может быть анализ элементного состава волос кисти хвоста, полученных у телят сразу после рождения, поскольку их рост начинается с 7-го месяца гестации [12, 15].

Цель исследований – изучить связи между содержанием микроэлементов в пробах волос кисти хвоста новорожденных тёлочек и показателями интенсивности их роста в течение первых 180 дней после рождения.

**Методика.** Объектом исследования служили 40 клинически здоровых телочек симментальской породы (*Bos taurus taurus*) в КХ «Речное» (Липецкая область, Россия). Новорожденные были получены от коров 2...5 лактации с продуктивностью 6489...9950 кг, выращенных в том же хозяйстве. Условия содержания и кормления экспериментальных животных в течение 180 дней после рождения были одинаковыми. Первые 14 дней после рождения тёлочек содержали в индивидуальных клетках профилактория, с 15-го дня до 2-х месяцев – в групповых боксах (по 7...9 голов в каждом), с 2-х до 6-и месяцев – в павильонах с выгульной площадкой. За время эксперимента животные получали 520 кг цельного молока, 240 кг люцернового сена, 365 кг кукурузного силоса, 116 кг зерна кукурузы, 100 кг зерна пшеницы и 4,5 кг минерального премикса. Содержание микроэлементов в рационе в целом соответствовало потребностям животных и не превышало максимального допустимых пределов [16].

Массу телочек определяли в 1-е сутки после рождения и в возрасте 180 дней, после чего рассчитывали ее среднесуточный прирост.

Образцы покровных не пигментированных волос из кисти хвоста у новорожденных получали вскоре после рождения, перед 1-м кормлением молозивом с использованием ножниц из нержавеющей стали, предварительно обработанных этиловым спиртом. Волос срезали макси-

мально близко к поверхности кожи, срезанные фрагменты тщательно перемешивали и формировали среднюю пробу массой не менее 0,5 г.

Пробоподготовку образцов волос и собственно анализ микроэлементов выполняли по методике, описанной ранее [17], в аккредитованной лаборатории ООО «Микроэлементы» (Москва, Россия), ассоциированной компании IUPAC. Образцы волос погружали в ацетон чда (Химмед, Россия) на 15 мин, трехкратно промывали деионизированной водой, затем сушили при температуре 60 °С до воздушно-сухого состояния с последующим измельчением на фрагменты длиной 2...3 мм. Отбирали навеску массой 50 мг, переносили её в пробирку, добавляли 5 мл концентрированной азотной кислоты осч (Химмед, Россия). Смесь разлагали в микроволновой печи Multiwave 3000 (PerkinElmer, Австрия) при следующем режиме: 5 мин – повышение температуры до 200 °С, 5 мин – стабилизация температуры 200 °С, затем – охлаждение до 45 °С. После этого содержимое переносили в полипропиленовые пробирки и доводили объём деионизированной водой до 15 мл. Пробирки плотно закрывали и тщательно перемешивали встряхиванием. Концентрации микроэлементов (селена, меди, цинка, марганца, кобальта, железа, хрома и молибдена) определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Nexion 300D, Perkin Elmer, США). Для градуировки спектрометра применяли моноэлементные наборы Universal Data Acquisition Standards Kit (СТ 06484, PerkinElmer, США), для внутренней стандартизации – одноэлементный стандарт чистого иттрия 10 мкг/л (Y, Perkin Elmer, США). В качестве эталона использовали образец волоса GBW09101 Шанхайского института ядерных исследований (Китай).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программе IBM SPSS Statistics 20.0 (IBM Corp., США). Все данные выражали как среднее арифметическое ( $M$ ) ± стандартная ошибка среднего (SEM), медиана (Me), минимальное (Min) и максимальное значение (Max). Рассчитывали коэффициент вариации. Связи между исследуемыми показателями выявляли с использованием критерия Спирмана.

В работе соблюдались все применимые международные, национальные и/или институциональные рекомендации по уходу и использованию животных. Образцы волос для анализа получали согласно стандартным процедурам без какого-либо вреда для животных. Разрешение на проведение исследований № 2–03/23 от 1 марта 2023 г. выдано комиссией по биоэтике при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский ветеринарный институт патологии, фармакологии и терапии».

**Результаты и обсуждение.** Масса новорожденных тёлочек в эксперименте варьировала от 26,5 до 31,5 кг (коэффициент вариации 4,57%) и составляла в среднем  $30,2 \pm 0,23$  кг (медиана 30,2 кг), в возрасте 180 дней – от 150,0 до 210,0 кг (коэффициент вариации 10,8%), в среднем  $177,3 \pm 3,43$  кг (медиана 180,0 кг). Среднесуточный прирост массы тела животных за 180 дней был равен  $658,0...1013$  г (коэффициент вариации 13,5%), в среднем  $820,5 \pm 20,6$  г (медиана 839,0 г).

Содержание исследованных микроэлементов в волосе новорожденных тёлочек отличалось значительной вариабельностью (табл. 1). Это может быть связано, как с различиями их матерей по молочной продуктивности (у высокопродуктивных коров плод может испытывать дефицит микроэлементов вследствие значительного выведения их с молоком матери) [11], так и с нарушениями транспортной функции плаценты [3, 5, 12]. У 15,0% обследованных новорожденных выявлен внутриутроб-

**Табл. 1. Содержание микроэлементов в волосе кисти хвоста у новорожденных тёлоч симментальской породы, мкг/г**

Микроэлемент (физиологические значения [15])	M ± SEM* (n = 40)	Me; Min...Max (n = 40)
Селен (0,160...0,367)	0,338 ± 0,022	0,352; 0,080...0,714
Медь (5,45...8,63)	6,51 ± 0,36	7,00; 2,10...10,6
Цинк (96,8...128)	95,3 ± 6,36	111,0; 15,9...140,8
Марганец (8,44...11,3)	10,2 ± 0,68	9,34; 5,60...17,4
Кобальт (0,040...0,084)	0,048 ± 0,006	0,044; 0,002...0,167
Железо (31,7...58,2)	51,2 ± 5,13	37,0; 10,2...123,5
Хром (0,015...0,028)	0,018 ± 0,001	0,016; 0,010...0,053
Молибден (0,017...0,062)	0,039 ± 0,006	0,022; 0,014...0,156

\*M – среднее арифметическое, SEM – стандартная ошибка среднего, Me – медиана, Min – минимальное значение, Max – максимальное значение.

ный дефицит селена, у 32,5% – меди, у 37,5% – цинка, у 22,5% – марганца, у 40,0% – кобальта, у 32,5% – железа, у 30,0% – хрома и у 25,0% – молибдена.

Результаты недавних исследований [12] свидетельствуют, что для телят с внутриутробной задержкой развития характерно пониженное содержание в волосе кисти хвоста меди, цинка, марганца, селена и кобальта. Логично ожидать, что величины этих показателей могут коррелировать с массой новорожденного. Тем не менее, в нашем эксперименте достоверные связи между этими признаками отсутствовали (табл. 2).

С другой стороны, достоверные связи выявлены между содержанием микроэлементов в волосе новорожденных и массой их тела в 180 дней, а также с ее среднесуточным приростом за первые 180 дней жизни (табл. 2). Так, величины этих показателей коррелировали с содержанием в волосе селена ( $r = 0,349$  и  $r = 0,408$  при  $p < 0,05$  соответственно), меди ( $r = 0,378$  и  $r = 0,440$  при  $p < 0,01$  соответственно), цинка ( $r = 0,455$  и  $r = 0,481$  при  $p < 0,01$  соответственно) и кобальта ( $r = 0,304$  и  $r = 0,344$  при  $p < 0,05$  соответственно). По марганцу, железу, хрому и молибдену таких связей не установлено.

Наши результаты дополняют выводы Glover et al. [18] о том, что масса тела телят при рождении никак не связана со случаями их респираторных заболеваний, неонатальной диареи или гибели в период до отъема. Тёлки с нормальной и избыточной массой при рождении, как и те, которые рождаются с низким весом, могут испытывать внутриутробный дефицит эссенциальных микроэлементов, предрасполагающий к заболеваниям.

**Табл. 2. Коэффициенты корреляции между содержанием микроэлементов в волосе кисти хвоста и показателями роста тёлоч симментальской породы в первые 180 дней жизни**

Микроэлемент	Масса тела, кг		Среднесуточный прирост массы тела за первые 180 дней жизни, г
	при рождении	в возрасте 180 суток	
Селен	-0,462	0,349*	0,408**
Медь	-0,470	0,378**	0,440**
Цинк	-0,387	0,455**	0,481**
Марганец	-0,244	0,181	0,242
Кобальт	-0,234	0,304*	0,344*
Железо	0,206	0,075	0,030
Хром	0,456	-0,329	-0,335
Молибден	0,412	-0,360	-0,387

\*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ .

С другой стороны, у тёлоч в эксперименте отмечены значительные межиндивидуальные различия по скорости роста в первые 180 дней жизни после рождения. Поскольку величину этого показателя считают ключевым морфофункциональным критерием для оценки молодняка крупного рогатого скота здоровья [19], наши данные (см. табл. 2) свидетельствуют об отдаленных негативных последствиях внутриутробного дефицита цинка, меди, селена и кобальта для здоровья растущих тёлоч.

Известно, что обеспеченность эссенциальными микроэлементами оказывает значительное влияние на формирование и развитие внутренних органов плода [5, 14]. В нашем исследовании внутриутробный дефицит цинка имел место у 37,5% тёлоч. Недостаточная обеспеченность этим элементом во время беременности может негативно влиять на развитие мозга, легких, сердца и скелета плода [5]. При развитии головного мозга дефицит цинка нарушает функцию генов ZIC (так называемых «цинковых пальцев»), которые необходимы для нормального формирования мозжечка [5]. В эксперименте на крысах показано, что дополнительное введение цинка в рацион беременных улучшало когнитивные способности потомства в результате увеличения экспрессии сигнального преобразователя и активатора транскрипции 3 (STAT3), а также матриксной металлопротеиназы-2/9 (MMP-2/9) [5, 7]. На моделях *in vitro* обнаружено, что при формировании сердца плода дефицит цинка изменяет распределение естественных клеточ-киллеров-1 (HNK-1) и коннексина 43 (Cx43) в миокарде, способствуя развитию сердечно-сосудистых патологий [5, 7].

У 32,5% новорожденных тёлоч мы наблюдали дефицит меди. Известно, что недостаточное поступление этого микроэлемента предрасполагает к оксидативному стрессу и нервно-дегенеративным нарушениям у развивающегося плода [5, 20]. Дефицит меди приводит к подавлению экспрессии металлотioneина 1A (MT1A), снижению активности супероксиддисмутазы и цитохром-с-оксидазы в тканях плода, необратимым изменениям в области красного ядра мозга, связанными с функциональной активностью крупных двигательных нейронов [5, 20]. В критические периоды своего развития плод особенно уязвим для дефицита меди, его последствия негативно влияют на функциональное состояние нервной, опорно-двигательной, иммунной и сердечно-сосудистой систем [5, 20]. Более того, стойкие структурные, биохимические и функциональные нарушения у потомства сохраняются даже в тех случаях, когда дефицит этого элемента начинают восполнять после рождения [20].

У 15,0% тёлоч в эксперименте отмечали низкую обеспеченность селеном. Это один из важнейших элементов, участвующих в регулировании клеточного цикла, развитии и функционировании тканей плода [21]. Известно, что потребность плода в селене значительно возрастает с увеличением срока гестации [5, 21]. Элемент осуществляет свое биологическое действие, входя в состав 25 селенопротеинов, большинство из которых обладают антиоксидантными свойствами, связаны с эндокринной регуляцией, ростом и регуляцией энергетического гомеостаза [21]. Дефицит селена во время беременности приводит к оксидативному стрессу, задержке развития плода и аномальному формированию его тканей [21], что опосредовано эндокринными и метаболическими нарушениями [5, 7]. Известно также, что низкая обеспеченность плода селеном ухудшает функцию двенадцатиперстной кишки, секрецию гормонов щитовидной железы, инсулина и инсулиноподобного фактора роста, негативно влияет на функциональную активность системы «гипоталамус-гипофиз-надпочечники» [21]. Обедненная селеном диета у беременных самок вызывает внутриутробную задержку развития плода со значительным уменьшением массы его сердца и почек, тяжелые нарушения ангио- и миогенеза, формирования щитовидной, поджелудочной желез и органов репродуктивной системы [21].

У 40,0% обследованных тёлоч в эксперименте диагностировали внутриутробный дефицит кобальта. Связь этого элемента со скоростью роста животных после рождения находит своё объяснение через его участие в процессах

кроветворения, синтезе мышечных белков, нуклеиновых кислот, обеспечении тканевого дыхания, регуляции энергетического, белкового и минерального обмена [3, 5, 16]. Показано, что дефицит кобальта у беременных животных ассоциирован с внутриутробной задержкой развития плода, респираторными дисфункциями и служит фактором риска развития бронхопневмонии в неонатальный период [10, 12].

Учитывая синергизм в метаболизме и биологических эффектах рассмотренных микроэлементов, важно отметить, что их дефицит у плода редко проявляется в моноварианте [5, 11, 12]. В нашем исследовании у 30,0% животных наблюдался комбинированный дефицит цинка и кобальта, у 25,0% – цинка и меди, у 22,5% – меди и кобальта, у 12,5% – меди и селена, у 7,5% – селена и кобальта, либо селена и цинка, у 5,0% – селена, цинка и меди, у 2,5% – селена, цинка, меди и кобальта.

Таким образом, внутриутробный дефицит цинка, меди, селена и кобальта у тёлоч (в моно- или комбинированном варианте) может вызывать глубокие морфофункциональные нарушения в их тканях и органах, служить фактором риска ряда заболеваний и ограничивать рост после рождения.

**Выводы.** Результаты исследования показывают, что масса тёлоч в возрасте 180 дней и среднесуточный прирост массы тела (в первые 180 дней жизни) прямо коррелируют с обеспеченностью их селеном ( $r = 0,349$  и  $r = 0,408$  при  $p < 0,05$  соответственно), медью ( $r = 0,378$  и  $r = 0,440$  при  $p < 0,01$  соответственно), цинком ( $r = 0,455$  и  $r = 0,481$  при  $p < 0,01$  соответственно) и кобальтом ( $r = 0,304$  и  $r = 0,344$  при  $p < 0,05$  соответственно) в последние месяцы внутриутробного развития. Влияния на эти признаки концентрации марганца, железа, хрома и молибдена не установлено. Текущие результаты и анализ литературных данных позволяют считать, что внутриутробный дефицит селена, меди, цинка и кобальта не оказывает воздействия на массу тёлоч при рождении, но, негативно влияя на здоровье животных, ограничивает их рост в первые 180 дней жизни.

#### Литература

1. Fukuoka H. DOHaD (developmental origins of health and disease) and birth cohort research // *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* 2015. Vol. 61. P. S2–S4. doi: 10.3177/jnsv.61.S2.
2. Greenwood P. L., Bell A. W. Developmental programming and growth of livestock tissues for meat production // *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 2019. Vol. 35. No. 2. P. 303–319. doi: 10.1016/j.cvfa.2019.02.008.
3. Van Emon M., Sanford C., McCoski S. Impacts of bovine trace mineral supplementation on maternal and offspring production and health // *Animals.* 2020. Vol. 10. No. 12. 2404. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/10/12/2404> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/ani10122404.
4. Robinson J. J., Sinclair K. D., McEvoy T. G. Nutritional effects on foetal growth. *Anim. Sci.* 1999. Vol. 68. No. 2. P. 315–331. doi: 10.1017/S1357729800050323.
5. Maternal mineral nutrition regulates fetal genomic programming in cattle: a review / M. Anas, W. J. Diniz, A. C. Menezes, et al. // *Metabolites.* 2023. Vol. 13. No. 5. 593. URL: <https://www.mdpi.com/2218-1989/13/5/593> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/metabo13050593.
6. Patel M. S., Srinivasan M. Metabolic programming in the immediate postnatal life // *Ann. Nutr. Metab.* 2011. Vol. 58. No. 2. P. 18–28. doi: 10.1159/000328040.
7. Wu G., Imhoff-Kunsch B., Girard A. W. Biological mechanisms for nutritional regulation of maternal health and fetal development // *Paediatr. Perinat. Epidemiol.* 2012. Vol. 26. No. 1. P. 4–26. doi: 10.1111/j.1365-3016.2012.01291.x.

8. Board-invited review: Intrauterine growth retardation: implications for the animal sciences / G. Wu, F. W. Bazer, J. M. Wallace, et al. // *J. Anim. Sci.* 2006. Vol. 84. No. 9. P. 2316–2337. doi: 10.2527/jas.2006-156.
9. Programming of embryonic development / C. R. Dahlen, P. P. Borowicz, A. K. Ward, et al. // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. No. 21. 11668. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/21/11668> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/ijms222111668.
10. Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis / E. Kalaeva, V. Kalaev, A. Chernitskiy, et al. // *Vet. World.* 2020. Vol. 13. No. 5. P. 987–995. doi: 10.14202/vetworld.2020.987-995.
11. Diselementosis as a risk factor of embryo loss in lactating cows / S. Shabunin, A. Nezhdanov, V. Mikhalev, et al. // *Turk. J. Vet. Anim. Sci.* 2017. Vol. 41. No. 4. P. 453–459. doi: 10.3906/vet-1609-76.
12. Safonov V. A., Mikhalev V. I., Chernitskiy A. E. Antioxidant status and functional condition of respiratory system of newborn calves with intrauterine growth retardation // *Agricultural Biology.* 2018. Vol. 53. No. 4. P. 831–841. doi: 10.15389/agrobiology.2018.4.831eng.
13. Growth-and breed-related changes of fetal development in cattle / W. H. Mao, E. Albrecht, F. Teuscher, et al. // *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 2008. Vol. 21. No. 5. P. 640–647.
14. Goff J. P. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status // *J. Dairy Sci.* 2018. Vol. 101. No. 4. P. 2763–2813. doi: 10.3168/jds.2017-13112.
15. Скрининг элементного состава волос у новорожденных телят как способ диагностики внутриутробного дисэлементоза / В. А. Сафонов, Т. С. Ермилова, Э. А. О. Салмзаде и др. // *Ветеринария и кормление.* 2022. № 5. С. 48–50. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-5-14.
16. Suttle N. F. *Mineral nutrition of livestock.* 5th ed. Boston: CABI, 2022. 600 p.
17. The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*) / S. A. Miroshnikov, O. A. Zavyalov, A. N. Frolov, et al. // *Biol. Trace Elem. Res.* 2017. Vol. 180. No. 1. P. 56–62. doi: 10.1007/s12011-017-0991-5.
18. Glover I. D., Barrett D. C., Reyher K. K. Little association between birth weight and health of preweaned dairy calves // *Vet. Rec.* 2019. Vol. 184. No. 15. 477. URL: <https://bvajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1136/vr.105062> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.1136/vr.105062.
19. Билан Е. А., Дерхо М. А. Масса тела как индикатор морфобиохимического состава крови тёлоч в условиях интенсивной технологии выращивания // *Генетика и разведение животных.* 2022. № 2. С. 76–82. doi: 10.31043/2410-2733-2022-2-75-82.
20. Influence of copper on early development: prenatal and postnatal considerations / J. Y. Uriu-Adams, R. E. Scherr, L. Lanoue, et al. // *Biofactors.* 2010. Vol. 36. No. 2. P. 136–152. doi: 10.1002/biof.85.
21. Fetal programming is deeply related to maternal selenium status and oxidative balance; experimental offspring health repercussions / M. L. Ojeda, F. Nogales, I. Romero-Herrera, et al. // *Nutrients.* 2021. Vol. 13. No. 6. 2085. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6643/13/6/2085> (дата обращения: 02.09.2023). doi: 10.3390/nu13062085.

Поступила в редакцию 15.09.2023  
После доработки 02.10.2023  
Принята к публикации 24.10.2023