

Влияние селеносодержащих добавок на метаболизм селена, продуктивные качества и микробиом кишечника у сельскохозяйственных животных (обзор)

Олег Александрович Завьялов

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, г. Оренбург, Россия, e-mail: Oleg-Zavyalov83@mail.ru

Аннотация. Одним из наиболее значимых для иммунной функции и общего состояния здоровья сельскохозяйственных животных эссенциальным элементом является селен. Роль его в поддержании здоровья животных основана, прежде всего, на функциях селеноцистеинсодержащих белков, многие из которых обладают антиоксидантной активностью. Недостаточное потребление селена может сопровождаться субклиническими заболеваниями, что приводит к снижению продуктивности. Установлено, что включение дополнительных источников селена оказывает значительное влияние на показатели прироста живой массы, качественные характеристики мяса, а также на микробиом кишечника крупного рогатого скота и других видов сельскохозяйственных животных (свиньи, птицы). Вместе с тем, несмотря на достаточно высокую изученность роли селена в реализации функциональных качеств сельскохозяйственных животных, в научном сообществе нет однозначного мнения об оптимальных дозировках и способах скармливания селена, что снижает эффективность применения селеносодержащих препаратов в практическом животноводстве.

Ключевые слова: крупный рогатый скот; селен; продуктивные качества; микробиом; speciation анализ.

Для цитирования: Завьялов О. А. Влияние селеносодержащих добавок на метаболизм селена, продуктивные качества и микробиом кишечника у сельскохозяйственных животных (обзор) // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 95–100. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp95-100>.

VETERINARY MEDICINE AND ZOOTECHNICS

Original article

The effect of selenium supplements on selenium metabolism, performance and intestinal microbiome in farm animals (review)

Oleg A. Zav'yalov

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia, e-mail: Oleg-Zavyalov83@mail.ru

Abstract. Selenium is one of the most important essential elements for immune function and general health of cattle. The role of selenium in maintaining animal health is primarily based on the functions of selenocysteine-containing proteins, many of which have antioxidant activity. Role of selenium in Animal Health is primarily based on the functions of selenocysteine-containing proteins, many of which possess antioxidant activity. Insufficient selenium intake can be accompanied by subclinical diseases, which leads to a decrease in productivity. It was determined that the inclusion of additional sources of selenium has a significant effect on live weight gain, quality characteristics of meat, as well as the intestinal microbiome in cattle and other types of farm animals (pigs, poultry). However, despite the rather high level of knowledge of the selenium role in the implementation of the functional traits in farm animals, there is still no consensus in the scientific community on the optimal dosages and methods of feeding selenium, which reduces the effectiveness of the use of selenium-containing preparations in practical animal husbandry.

Keywords: cattle; selenium; productive traits; microbiome; speciation analysis.

For citation: Zav'yalov O. A. The effect of selenium supplements on selenium metabolism, performance and intestinal microbiome in farm animals (review). Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(12): 95–100. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp95-100>.

Для обеспечения развития животноводства и покрытия все возрастающих потребностей человека в продуктах питания необходимо дальнейшее повышение продуктивности сельскохозяйственных животных [1, 2]. В настоящее время в качестве стратегии повышения продуктивности скота рассматривается выведение новых высокопродуктивных пород и кроссов с использованием генетических методов, а также повышение эффективности кормления [3]. Обеспечение адекватного поступления в организм животных микронутриентов является одним из основных условий эффективного животноводства [4]. Важным фак-





тором, лимитирующим эффективность животноводства, является дефицит микронутриентов, в том числе эссенциальных элементов, с последующим развитием ассоциированных патологий [5]. При этом коррекция уровня обмена отдельных металлов характеризуется снижением риска развития данных заболеваний и может в ряде случаев обладать стимулирующим влиянием на продуктивные качества сельскохозяйственных животных [6]. Одним из наиболее значимых для иммунной функции и общего состояния здоровья эссенциальным элементов является селен [7, 8]. Недостаточное его потребление может сопровождаться субклиническими заболеваниями, что приводит к снижению продуктивности [9]. Роль селена в поддержании здоровья животных основана, прежде всего, на функциях селеноцистеинсодержащих белков, многие из которых обладают антиоксидантной активностью [10]. Анализ литературных данных показывает, что включение дополнительных источников селена в рационы крупного рогатого скота рекомендуется для увеличения производства молока, мяса и улучшения качества получаемой продукции [11]. В то же время, несмотря на достаточно высокую изученность роли селена в реализации функциональных качеств сельскохозяйственных животных, в научном сообществе нет однозначного мнения об оптимальных формах элемента (органическая/неорганическая), наиболее эффективных для скармливания. Кроме того, недостаточно изучены фундаментальные основы влияния селена в составе различных селенопротеинов на микробиом кишечника и продуктивные качества животных и птицы. Все это снижает эффективность применения селенсодержащих препаратов в практическом животноводстве.

В связи вышесказанным целью настоящей работы являлась попытка систематизировать исследования по оценке влияния селенсодержащих добавок на метаболизм селена (в т.ч. селенопротеинов), продуктивные качества и микробиом кишечника сельскохозяйственных животных.

Селен является эссенциальным микроэлементом (металлоидом) для всех млекопитающих, в том числе и крупного рогатого скота. В частности, установлен характерный спектр патологий, связанный с дефицитом селена в рационе животных [12]. В то же время модуляция обмена селена у КРС рассматривается в качестве потенциального инструмента повышения продуктивности сельскохозяйственных животных. Широкий спектр биологических функций селена обусловлен его ролью в составе селенсодержащих белков (селенопротеинов) [13]. Так, ряд селенопротеинов, таких как глутатионпероксидаза (GPx), тиоредоксинредуктаза (TRxR), метионин-сульфоксид редуктаза (MsrA) обладают преимущественно антиоксидантными функциями, а также оказывают сигнальный эффект посредством модуляции редокс-гомеостаза [14]. Лишь данные белки относительно часто рассматриваются в аспекте изучения метаболизма селена у крупного рогатого скота. В свою очередь, селенопротеин Р выполняет депонирующую, транспортную, а также антиоксидантную функции [15]. Определены и другие селенопротеины, такие как селенопротеин W, N, K, однако их функции менее специфичны и/или изучены недостаточно [16]. Более того, особенности обмена селена и особенно селенопротеинов у крупного рогатого скота практически не изучены. Полностью отсутствуют данные о взаимосвязи металломики селена и продуктивности мясного скотоводства и потенциальных механизмах реализации данной взаимосвязи.

Изучение особенностей обмена селена и селенопротеинов у крупного рогатого скота является принципиальной фундаментальной и практической задачей. В настоящее время наиболее значимыми инструментами достижения данной цели являются генетический анализ и определение форм (speciation анализ) селена в тканях организма. В частности, в одном из последних наиболее полных обзоров роли селена в организме крупного рогатого скота отмечается значимость проведения определения форм селена как в кормах, так и в тканях организма крупного рогатого скота [17].

Анализ литературных источников последних лет показал, что данные, касающиеся изучения фундаментальных основ обмена селена у крупного рогатого скота, ограничены. В частности, проведено исследование по оценке содержания селеноцистеина, селенометионина, селенометионин-О-оксида и неорганических форм селена (селенат/селенит) в образцах кормов и тканей быков с использованием метода ВЭЖХ-ИСП-МС [18]. С использованием комбинированной методики SEC-ICP-сcMS коллектив под руководством проф. Lobinski продемонстрировал характер распределения ряда форм селена в крови коров в ответ на применение селенизированных дрожжей. Установлено также, что повышение уровня селена в крови сопровождается достоверным увеличением концентрации селенометионина и селенизированного гемоглобина [19]. Нельзя не отметить данные speciation анализа селена в образцах молока молочных коров, полученные с использованием LC-UV-HG-AFS метода. В частности, применение органического соединения селена приводило к достоверному повышению концентрации SeCyst2, Se(IV) и SeMet, тогда как использование селенита натрия сопровождалось выявлением в молоке только SeCyst2 и Se(IV) [20]. Лишь в отдельных работах исследован спектр селенопротеинов в сыворотке крови крупного рогатого скота. Сравнительный анализ эффективности применения селенита натрия и селенизированных дрожжей у быков показал, что селенопротеин Р является наиболее значимой фракцией селена в сыворотке крови, тогда как глутатионпероксидаза содержит наименьшее количество селена [21].

Несмотря на то, что модуляция обмена селена может рассматриваться в качестве инструмента повышения продуктивности мясного скота [22], данных относительно влияния обеспеченности организма



крупного рогатого скота селеном на показатели продуктивности и качества мяса также недостаточно. В частности, в условиях дефицита селена в почве введение в рацион обогащенной им люцерны дозозависимо повышало концентрацию элемента в цельной крови телят, а также оказывало достоверное стимулирующее влияние на прирост живой массы [23]. Несмотря на то, что введение в качестве прикорма селена молочным телятам в течение 75 суток не приводило к достоверному увеличению общей и мышечной массы тела, применение его способствовало сохранению прироста массы у животных с диареей за счет повышения иммунологической реактивности [24]. В ходе недавнего исследования, проведенного в Италии, продемонстрирована эффективность селена в повышении показателей роста, иммунитета (снижение респираторных заболеваний) и антиоксидантной активности у бычков в стадии адаптации после поступления в хозяйство [25]. Также отмечено, что концентрация селена в сыворотке крови гипотрофичных коров характеризуется достоверным снижением по отношению к физиологически здоровым особям, что может быть связано с низким уровнем селена в рационе ($< 0,2$ мкг/г). Более того, низкая концентрация селена в стаде является предиктором развития дегенеративной миопатии в последующих отелах [26]. Установлено, что дополнение рациона стельных коров селеносодержащей солью и обогащенным селеном фуражом хотя и повышает активность глутатионпероксидазы крови у телят, но не оказывает влияние на уровень гормонов щитовидной железы, что свидетельствует о недостаточном компенсаторном влиянии селеносодержащих добавок в отношении селенопротеинов щитовидной железы (деиодиназа). Это указывает на недостаток подобных мер при разведении животных на бедных селеном почвах [27]. В то же время в ряде исследований отмечено, что дополнительное обогащение селеном рациона не приводило к достоверному изменению прироста живой массы и качества мяса бычков [28], хотя и сопровождалось увеличением уровня селена в тканях. При изучении характера влияния селена на характеристики мяса бельгийских голубых быков не было выявлено ассоциации между воздействием селена и показателями нежности мяса. Сравнительный анализ применения селенизированных дрожжей и аналогичной концентрации селенита натрия у быков продемонстрировал более выраженную эффективность органифицированного селена в отношении уровня металлоида в тканях, но не устойчивости мяса к окислению [29]. Напротив, комбинированное применение селена и меди при кормлении быков абердин-ангусской породы приводило к достоверному снижению уровня холестерина в мясе, при этом отмечалось повышение эффективности конверсии корма в продукцию [30]. Аналогично, в исследовании A.M. Dalia et al., уровень селена в мясе был ассоциирован с соотношением окисленного и восстановленного глутатиона и содержанием холестерина в мясе [31]. Таким образом, данные о влиянии селена на продуктивность крупного рогатого скота и качество мяса не только немногочисленны, но и во многом противоречивы, что свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в данной области [32].

В то же время стоит отметить, что положительное влияние селена на качество мяса и продуктивность было отмечено среди других видов сельскохозяйственных животных (свиней, кроликов, бройлеров). В частности, при сравнении эффективности различных форм селена более выраженный эффект органических соединений был продемонстрирован в отношении качества мяса свиней, будучи также взаимосвязанным с величиной pH [33]. Кроме того, было продемонстрировано влияние селена на жирнокислотный состав мяса, что сопровождалось повышением активности 9-десатуразы и элонгазы, а также увеличением содержания жирных кислот [34]. На основании данных, полученных Y. Liu et al. [35], предполагается, что обогащенные селеном пробиотики могут не только стимулировать набор массы молочных поросят в условиях высокой температуры, но и являться альтернативой антибиотикам. Введение в рацион кроликов селеносодержащих добавок в диапазоне $0,08 - 0,70$ мг/кг приводило к достоверному повышению прироста массы тела и повышению коэффициента конверсии корма [36]. Более того, селен, особенно в комбинации с витамином E, также способствовал окислительной устойчивости мяса кроликов, повышая антиоксидантный статус сыворотки, равно как и иммунологическую реактивность животных [37].

Показано, что кормление с добавкой селенизированных дрожжей существенно улучшает показатели конверсии корма и продуктивности у бройлеров, при этом оказывая более выраженный эффект по сравнению с селенитом натрия [38]. При этом данный эффект является время- и дозозависимым [39]. Также отмечается улучшение цвета мяса, что, вероятно, связано с повышением активности глутатионпероксидазы, в большей степени при употреблении органической формы селена [40]. При сравнении эффективности селенита натрия, селеносодержащих дрожжей, селенометионина и наночастиц селена показано, что органические соединения селена и Se-содержащие наночастицы обладают наиболее выраженным влиянием на антиоксидантную активность и качество мяса китайских шелковистых кур [41]. Показано, что в условиях теплового стресса у бройлеров происходит существенное снижение набора массы, что может быть, по крайней мере частично, обусловлено иммунологическими нарушениями, характеризующимися в первую очередь дегенерацией лимфоидной ткани, тогда как введение в рацион селена оказывало иммунопротективный эффект и улучшало значения коэффициента конверсии корма [42]. В то же время в другом исследовании [43] не было установлено статистически значимого



влияния введения в рацион бройлеров селеносодержащих дрожжей или хлореллы на набор живой массы и качественные характеристики мяса.

Ни в одном из исследований, демонстрирующих влияние селена на продуктивность и качество мяса ряда сельскохозяйственных животных и птицы, не был в сколько-нибудь достаточной степени изучен вопрос взаимосвязи особенностей обмена селена и селенопротеинов (за исключением оценки активности глутатионпероксидазы, которая не всегда может являться информативным маркером продуктивности животных).

Несмотря на широкий спектр биологических эффектов селена и селенопротеинов, включающий в себя, в том числе, относительно хорошо изученное влияние на редокс-гомеостаз и механизмы развития воспалительной реакции, в ряде исследований преимущественно последних лет указывается значимость взаимного влияния обмена селена и микробиома кишечника. Так, с одной стороны, метаболическая активность кишечной микрофлоры, по крайней мере частично, опосредует характер изменения экспрессии селенопротеинов в тканях в ответ на воздействие селена [44]. Микрофлора кишечника также участвует в экскреции избыточных количеств селена посредством продукции метилированных метаболитов [45]. Например, в значительной степени микрофлора кишечника обеспечивает конверсию наночастиц селена в другие формы, включая селенит натрия, селенофосфат или селеноводород. С другой стороны, селен обладает непосредственной стимулирующей «пребиотической» активностью в отношении нормальной микрофлоры кишечника [46]. Кроме того, он обладает стимулирующим влиянием на функциональную активность микрофлоры рубца, повышая ее ферментирующую активность [47]. Установлено, что введение в рацион селена в форме наночастиц существенно повышает количество бактерий родов *Lactobacillus* и *Faecalibacterium*, обладающих благоприятным влиянием на процессы рубцового пищеварения [48]. Селен также обладает стимулирующим влиянием в отношении *Bifidobacterium* [49]. Однако, несмотря на иную локализацию, стоит отметить, что телята, содержащиеся на рационе из обогащенной селеном люцерны, также характеризуются более высоким биоразнообразием назофарингеальной микрофлоры [50], что может обуславливать снижение заболеваемости респираторными инфекциями и частично нивелировать их негативные последствия для организма [51]. Таким образом, обмен селена в организме оказывает значительное влияние на микробиом различных биотопов, в том числе кишечника, что может по крайней мере частично опосредовать часть биологических эффектов селена на продуктивные качества крупного рогатого скота.

Помимо непосредственного влияния селена на качественный и количественный состав микробиоты желудочно-кишечного тракта установлено, что дополнительное введение в рацион этого элемента способствует нормализации барьерной функции кишечника бройлеров, а также свиней в условиях температурного стресса [52]. Кроме того, селен оказывает протективный эффект на морфофункциональную организацию кишечных ворсинок в условиях инфицирования реовирусом [53]. Экспериментальные исследования, в том числе с использованием клеточных культур, показали, что селенопротеины играют значительную роль в функционировании энтероцитов, поддержании клеточных контактов, а также снижении интенсивности воспаления [54]. Наряду с качественным и количественным составом микробиома кишечника интегральным маркером как непосредственно характеристик микрофлоры, так и проницаемости кишечной стенки является уровень циркулирующего липополисахарида (ЛПС) [55]. Являясь триггером воспалительной реакции, повышение уровня липополисахарида в циркулирующей крови животных ассоциировано с иммунологическими нарушениями, развитием окислительного стресса, а также снижением интенсивности роста и качества мяса [56]. Применение селена тормозило ЛПС-индуцированную воспалительную реакцию в клетках крупного рогатого скота, а также свиней и птицы [57]. В то же время данные, касающиеся влияния селенового статуса на уровень ЛПС в организме крупного рогатого скота как интегрального показателя барьерной функции кишечника и состояния микрофлоры, отсутствуют. Лишь в одном эксперименте была исследована взаимосвязь между характеристиками микробиома кишечника и отдельными селенопротеинами [58]. В ходе дальнейших исследований выявлена значительная роль селенопротеина в регуляции биоразнообразия микробиома кишечника у цыплят [59]. Подобных исследований у крупного рогатого скота не проводилось.

Таким образом, анализ современного состояния исследований по данной проблеме продемонстрировал отсутствие данных об особенностях распределения селена и метаболизма селенопротеинов у крупного рогатого скота и, как следствие, недостаточно изученную взаимосвязь между продуктивностью и потребностью организма животных в селене и при его дефиците.

Полностью отсутствуют данные о характеристике металломики селена в зависимости от морфометрических и генетических маркеров мясной продуктивности, а также его качества. Недостаточно изучена взаимосвязь метаболизма селена и других металлов с функциональными параметрами, в том числе микробиомом кишечника крупного рогатого скота.

Анализ литературных источников показал, что, несмотря на достаточно высокую изученность вопроса оценки и нормирования содержания селена в задаваемых рационах, дальнейший этап реализации заявленной проблемы – разработка норм и референтных интервалов концентрации селена в биологически активных субстратах высокопродуктивных сельскохозяйственных животных и птицы. Это позволит оценивать количество селена непосредственно вовлеченного в обменные процессы организма и создаст фундаментальную основу для разработки эффективных технологий коррекции статуса селена с целью повышения продуктивности и качества получаемой продукции.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (тема № 0761-2019-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект «Концепции устойчивого развития мясного скотоводства в Российской Федерации на период до 2030 года» / Х. А. Амерханов [и др.] // Вестник мясного скотоводства. 2017. № 1 (97). С. 7–12.
2. Состояние и тенденции в производстве мяса домашних животных в мире и России / А. И. Ерохин [и др.] // Овцы, козы, шерстяное дело. 2021. № 2. С. 20–22.
3. Мирошников С. А. Отечественное мясное скотоводство: проблемы и решения // Вестник мясного скотоводства. 2011. № 3(64). С. 7–12.
4. Резниченко В. Г., Дускаев Г. К., Киржаев В. В. Зависимость концентрации аммиака в рубце от техники скормливания корма // Вестник мясного скотоводства. 2006. № 2(59). С. 42–43.
5. Inhibition of bacterial quorum sensing by the ruminal fluid of cattle / I. F. Karimov et al. *International Journal of GEOMATE*. 2017;3(40):88–92.
6. Влияние различных уровней концентраций селена в сыворотке крови на показатели молочной продуктивности и антиоксидантный статус коров симментальской породы / И. Н. Сычева [и др.] // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2022. № 3(63). С. 60–65.
7. Влияние различных уровней эссенциальных и токсичных элементов в семенной жидкости на качественные характеристики спермы быков-производителей голштинской породы / О. А. Завьялов [и др.] // Пермский аграрный вестник. 2022. № 2(38). С. 118–128.
8. Hefnawy A. E., Tortora-Perez J. L. The importance of selenium and the effects of its deficiency in animal health. *Small Rumin. Res.* 2010;(89):185–192. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2009.12.042.
9. Role of selenium in male reproduction: A review / U. Ahsan et al. *Anim. Reprod. Sci.* 2014;(146):55–62. DOI: 10.1016/j.anireprosci.2014.01.00.
10. Fairweather-Tait S. J., Collings R., Hurst R. Selenium bioavailability: Current knowledge and future research requirements. *Am. J. Clin. Nutr.* 2010;(91): 1484–1491. DOI: 10.3945/ajcn.2010.28674J.
11. Effect of supranutritional maternal and colostral selenium supplementation on passive absorption of immunoglobulin G in selenium-replete dairy calves / J. A. Hall et al. *J. Dairy Sci.* 2014;(97):4379–4391. DOI: 10.3168/jds.2013-7481
12. Meat composition and quality of young growing Belgian Blue bulls offered a fattening diet with selenium enriched cereals / Y. Mehdi et al. *Can. J. Anim. Sci.* 2015;(95):465–473. DOI: 10.4141/cjas-2014-114.
13. Papp L. V., Holmgren A., Khanna K. K. Selenium and selenoproteins in health and disease. *Antioxid. Redox Signal.* 2010;(12): 793–795. DOI: 10.1089/ars.2009.2973.
14. Mehdi Y., Dufrasne I. Selenium in Cattle: A Review. *Molecules*. 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545.
15. Davis C. D., Tsuji P. A., Milner J. A. Selenoproteins and cancer prevention. *Annu. Rev. Nutr.* 2012;(32):73–95. DOI: 10.1146/annurev-nutr-071811-150740.
16. Effect of parenteral antioxidant supplementation during the dry period on postpartum glucose tolerance in dairy cows / A. Abuelo et al. *J. Vet. Intern. Med.* 2016. DOI: 10.1111/jvim.13922.
17. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions / Y. Mehdi et al. *Molecules*. 2013;(18):3292–3311. DOI: 10.3390/molecules18033292.
18. Effects of copper and selenium supplementation on performance and lipid metabolism in confined brangus bulls / A. S. Netto et al. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 2014;(27):488–494. DOI: 10.5713/ajas.2013.13400.
19. Effect of type of muscle and Cu supplementation on trace element concentrations in cattle meat / M. Garcia-Vaquero et al. *Food Chem. Toxicol.* 2011;(49):1443–1449. DOI: 10.1016/j.fct.2011.03.041.
20. Selenium speciation in cow milk obtained after supplementation with different selenium forms to the cow feed using liquid chromatography coupled with hydride generation-atomic fluorescence spectrometry / O. Muñiz-Naveiro et al. *Talanta*. 2007;71(4):1587–1593. DOI: 10.1016/j.talanta.2006.07.040.
21. Lipid and selenium sources on fatty acid composition of intramuscular fat and muscle selenium concentration of Nellore steers / A. S. C. Pereira et al. *Rev. Bras. Zootec.* 2012;(41):2357–2363. DOI: 10.1590/S1516-35982012001100009.
22. Selenium in feedstuffs and rations for dairy cows including a view of the food chain up to the consumer / F. Schöne et al. *J. Verbrauch. Lebensm.* 2013;(8):271–280. DOI: 10.1007/s00003-013-0827-y.
23. Effects of selenium on animal health / K. Żarczyńska et al. *J. Elemntol.* 2013;(18):329–340. DOI: 10.5601/jelem.2013.18.2.12.
24. Performance and immune response of suckling calves fed organic selenium / M. S. V. Salles et al. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2014;(188):28–35. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2013.11.008.
25. Справочные интервалы концентраций химических элементов в семенной жидкости быков-производителей голштинской породы / О. А. Завьялов [и др.]. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2022;(94):187–194.
26. Burk R. F., Hill K. E. Selenoprotein P-Expression, functions, and roles in mammals. *Biochim. Biophys. Acta*. 2009;(1790):1441–1447. DOI: 10.1016/j.bbagen.2009.03.026.
27. Effect of Se on selenoprotein activity and thyroid hormone metabolism in beef and dairy cows and calves / J. E. Rowntree et al. *J. Anim. Sci.* 2004;(82):2995–3005.





28. Effect of water activity on lipid oxidation and protein solubility in freeze-dried beef during storage / Q. Sun et al. *J. Food Sci.* 2002;(67):2512–2516. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08768.x.
29. Завьялов О. А. Влияние различных концентраций Se в семенной жидкости на качественные характеристики спермы и антиоксидантный статус быков-производителей голштинской породы // Пермский аграрный вестник. 2022. № 4(40). С. 89–97.
30. Copper and selenium supplementation in the diet of Brangus steers on the nutritional characteristics of meat / A. S. Netto et al. *Rev. Bras. Zootec.* 2013;(42):70–75. DOI: 10.1590/S1516-35982013000100010.
31. The effect of dietary bacterial organic selenium on growth performance, antioxidant capacity, and Selenoproteins gene expression in broiler chickens / A. M. Dalia et al. *BMC Vet Res.* 2017;(18):254. DOI: 10.1186/s12917-017-1159-4.
32. Effects of copper and selenium supplementation on performance and lipid metabolism in confined brangus bulls / A. S. Netto et al. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 2014;(27):488–494. DOI: 10.5713/ajas.2013.13400.
33. High Dietary Selenium Intake Alters Lipid Metabolism and Protein Synthesis in Liver and Muscle of Pigs / Z. Zhao et al. *J. Nutr.* 2016;146(9):1625–1633. DOI: 10.3945/jn.116.229955.
34. Supranutritional selenium induces alterations in molecular targets related to energy metabolism in skeletal muscle and visceral adipose tissue of pigs / A. Pinto et al. *J Inorg Biochem.* 2012;(114):47–54.
35. Prolonged dietary selenium deficiency or excess does not globally affect selenoprotein gene expression and/or protein production in various tissues of pigs / Y. Liu et al. *J Nutr.* 2012;(142):1410–1416.
36. Growth Response in *Oryctolagus cuniculus* to Selenium Toxicity Exposure Ameliorated with Vitamin E / R. Rehman et al. *Biomed Res Int.* 2022; 9:8216685. DOI: 10.1155/2022/8216685.
37. Antioxidants (selenium and garlic) alleviated the adverse effects of tramadol on the reproductive system and oxidative stress markers in male rabbits / S. A. Sheweita et al. *Sci Rep.* 2022;12(1):13958. DOI: 10.1038/s41598-022-16862-4.
38. The impact of vitamin E and/or selenium dietary supplementation on growth parameters and expression levels of the growth-related genes in broilers / O. A. Khalifa et al. *BMC Vet Res.* 2021;17(1):251. DOI: 10.1186/s12917-021-02963-1.
39. A new selenium source from Se-enriched Cardamine violifolia improves growth performance, anti-oxidative capacity and meat quality in broilers / X. Xu et al. *Front Nutr.* 2022;(9):996932. DOI: 10.3389/fnut.2022.996932.
40. Effects of dietary supplementation with selenium yeast and jujube powder on mitochondrial oxidative damage and apoptosis of chicken / X. Yang et al. *Poult Sci.* 2022;101(10):102072. DOI: 10.1016/j.psj.2022.102072.
41. Prophylactic impact of nano-selenium on performance, carcasses quality, and tissues' selenium concentration using reversed-phase high-performance liquid chromatography during microbial challenge in broiler chickens / E. S. Soliman et al. *Vet World.* 2020;13(9):1780–1797. DOI: 10.14202/vetworld.2020.1780-1797.
42. Selenium and/or vitamin E upregulate the antioxidant gene expression and parameters in broilers / F. Elgendey et al. *BMC Vet Res.* 2022;18(1):310. DOI: 10.1186/s12917-022-03411-4.
43. Effects of different selenium sources on duodenum and jejunum tight junction network and growth performance of broilers in a model of fluorine-induced chronic oxidative stress / S. Chen et al. *Poult Sci.* 2022;101(3):101664. DOI: 10.1016/j.psj.2021.101664.
44. Dietary selenium affects host selenoproteome expression by influencing the gut microbiota / M. V. Kasaikina et al. *FASEB J.* 2011;25(7): 2492–2499. DOI: 10.1096/fj.11-181990.
45. Formation of tellurium nanocrystals during anaerobic growth of bacteria that use the oxyanions as respiratory electron acceptors / S. M. Baesman et al. *Appl. Environ. Microbiol.* 2007;(73): 2135–2143.
46. Stolz J. F., Basu P., Santini J.M., Oremland R. S. Arsenic and selenium in microbial metabolism. *Annu. Rev. Microbiol.* 2006;(60):107–130.
47. Selenium content in representative Korean foods / Y. Choi et al. *J. Food Compos. Anal.* 2009;(22):117–122. DOI: 10.1016/j.jfca.2008.11.009.
48. The gastrointestinal microbiota affects the selenium status and selenoprotein expression in mice / J. Hrdina et al. *J. Nutr. Biochem.* 2009;(20):638–648.
49. Regulation of selenoproteins and methionine sulfoxide reductases A and B1 by age, calorie restriction, and dietary selenium in mice / S. V. Novoselov et al. *Antioxid. Redox Signal.* 2010;(12):829–838.
50. Non-pathogenic bacteria modulate colonic epithelial gene expression in germ-free mice / K. Fukushima et al. *Scan. J. Gastroenterol.* 2003;(38):626–634.
51. Selenoprotein deficiency and high levels of selenium compounds can effectively inhibit hepatocarcinogenesis in transgenic mice / S. V. Novoselov et al. *Oncogene.* 2005;(24):8003–8011.
52. Noruzi S., Torki M., Mohammadi H. Effects of supplementing diet with Thyme (*Thymus vulgaris* L.) essential oil and/or selenium yeast on production performance and blood variables of broiler chickens. *Vet Med Sci.* 2022;8(3):1137–1145. DOI: 10.1002/vms3.736.
53. Dietary selenium yeast supplementation improved some villi morphological characteristics in duodenum and jejunum of young goats / Z. Ahmed et al. *J Anim Plant Sci.* 2016;26(2):382–387.
54. Effect of different sources of selenium on performance and characteristics of immune system of broiler chickens / R. Shabani et al. *Rev Bras Zootec.* 2019. DOI: 10.1590/rbz4820180256.
55. Selenium-rich yeast attenuates ochratoxin A-induced small intestinal injury in broiler chickens by activating the Nrf2 pathway and inhibiting NF-KB activation / C. Tong et al. *J Funct Foods.* 2020. DOI: 10.1016/j.jff.2020.103784.
56. Effects of organic, inorganic, and nano-Se on growth performance, antioxidant capacity, cellular and humoral immune responses in broiler chickens exposed to oxidative stress / A. Boostani et al. *Livest Sci.* 2015;(178):330–336. DOI: 10.1016/j.livsci.2015.05.004.
57. Effect of supplementation of Selenium and Ashwagandha (*Withania somnifera*) on some haematological and immunological parameters of broiler chickens / V. P. Singh et al. *Scholars J Agric Vet Sci.* 2016. doi: 10.21276/sjavs.2016.3.6.2.
58. Mahan D. C., Parrett N. A. Evaluating the efficacy of selenium-enriched yeast and sodium selenite on tissue selenium retention and serum glutathione peroxidase activity in grower and finisher swine. *J Anim Sci.* 1996;74(12):2967–2974. DOI: 10.2527/1996.74122967x.
59. Influence of bacterial organic selenium on blood parameters, immune response, selenium retention and intestinal morphology of broiler chickens / A. M. Dalia et al. *BMC Vet Res.* 2020;16(1):365. DOI: 10.1186/s12917-020-02587-x.

Статья поступила в редакцию 10.03.2023; одобрена после рецензирования 20.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.
The article was 10.03.2023; approved after reviewing 20.04.2023; accepted for publication 28.04.2023.