

Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 2. С. 8-29.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2026. Vol. 109. No. 2. P. 8-29.

ФИЗИОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ

Обзорная статья
УДК 636.085:577.17
doi: 10.33284/2658-3135-109-2-8

Влияние селеносодержащих добавок на продуктивность и микробиоту сельскохозяйственных животных

Олег Александрович Завьялов¹, Алексей Николаевич Фролов²

^{1,2}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹oleg-zavyalov83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

²forleh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

Аннотация. Повышение продуктивности сельскохозяйственных животных является ключевой задачей для обеспечения продовольственной безопасности. Одним из важнейших условий эффективности животноводства выступает полноценное минеральное питание, в частности, обеспеченность организма незаменимым микроэлементом селеном. Дефицит селена приводит к развитию патологий, снижению иммунитета и продуктивных качеств. В данной работе представлен систематический анализ современных литературных данных, посвященных применению селеносодержащих добавок в животноводстве. Основное внимание уделено их влиянию на метаболические процессы, продуктивные показатели и состав кишечной микрофлоры у крупного рогатого скота, свиней и птицы. Поиск литературы проводился в базах данных РИНЦ, PubMed, Scopus, Web of Science за период 2000-2025 гг. В обзоре рассмотрены современные представления о метаболизме селена и роли селенопротеинов (глутатионпероксидаза, селенопротеин Р и др.) в антиоксидантной защите и редокс-сигналинге. Отмечается, что, несмотря на доказанную эффективность органических форм селена (селенометионин) по сравнению с неорганическими солями, фундаментальные механизмы воздействия селена на организм, особенно на микробиом кишечника и ось «кишечник-печень», изучены фрагментарно. Особое внимание уделяется инновационным источникам микроэлемента: селен-обогащенным пробиотикам и наночастицам селена. Показано, что данные формы не только повышают биодоступность селена, но и способны модулировать состав кишечной микрофлоры, увеличивая численность полезных бактерий (*Lactobacillus*, *Akkermansia*, *Prevotella*), что опосредованно улучшает метаболизм хозяина, антиоксидантный статус и продуктивность. В заключении обосновывается необходимость разработки референтных интервалов содержания селена в биосубстратах для высокопродуктивных животных и подчеркивается перспективность использования инновационных форм селена для направленной коррекции микробиома и повышения качества животноводческой продукции.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, селен, продуктивность, микробиом, селен-обогащенные бактерии, наноселен, биодоступность

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0001).

Для цитирования: Завьялов О.А., Фролов А.Н. Влияние селеносодержащих добавок на продуктивность и микробиоту сельскохозяйственных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 2. С. 8-29. [Zavyalov OA, Frolov AN. The effect of selenium-containing supplements on productivity and microbiota of farm animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(2):8-29. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-2-8>

PHYSIOLOGY OF ANIMALS

Review article

The effect of selenium-containing supplements on productivity and microbiota of farm animals

Oleg A Zavyalov¹, Alexey N Frolov²

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

¹oleg-zavyalov83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2033-3956>

²forleh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4525-2554>

Abstract. Enhancing the productivity of farm animals is a key objective for ensuring food security. One of the most critical conditions for the efficiency of livestock farming is adequate mineral nutrition, particularly the supply of the essential trace element selenium to the body. Selenium deficiency leads to the development of pathologies, reduced immunity, and decreased productive traits. This paper presents a systematic analysis of current literature on the use of selenium-containing supplements in animal husbandry. The main focus is on their influence on metabolic processes, productive indicators, and the composition of the intestinal microflora in cattle, pigs, and poultry. The literature search was conducted in the RSCI, PubMed, Scopus, and Web of Science databases for the period 2000-2025. The review examines current understanding of selenium metabolism and the role of selenoproteins (glutathione peroxidase, selenoprotein P, etc.) in antioxidant defense and redox signaling. It is noted that, despite the proven effectiveness of organic forms of selenium (selenomethionine) compared to inorganic salts, the fundamental mechanisms of selenium's effect on the body, especially on the gut microbiome and the "gut-liver" axis, remain fragmentarily studied. Particular attention is paid to innovative sources of the trace element: selenium-enriched probiotics and selenium nanoparticles. It is shown that these forms not only increase the bioavailability of selenium but are also capable of modulating the composition of the intestinal microflora, increasing the abundance of beneficial bacteria (*Lactobacillus*, *Akkermansia*, *Prevotella*), which indirectly improves host metabolism, antioxidant status, and productivity. In conclusion, the necessity of developing reference intervals for selenium content in biological substrates for highly productive animals is substantiated, and the promising nature of using innovative forms of selenium for the targeted correction of the microbiome and improving the quality of livestock products is emphasized.

Keywords: cattle, selenium, productivity, microbiome, selenium-enriched bacteria, nanoselenium, bioavailability

Acknowledgments: the work was supported in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0001).

For citation: Zavyalov OA, Frolov AN. The effect of selenium-containing supplements on productivity and microbiota of farm animals (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2026;109(2):8-29. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-2-8>

Введение.

Для удовлетворения растущего спроса населения на продукты питания необходимо наращивание продуктивности сельскохозяйственных животных (Дускаев Г.К. и др., 2024; Дускаев Г.К. и др., 2022). Ключевыми стратегиями в этой области являются селекционно-генетическая работа по созданию новых пород и кроссов, а также совершенствование систем кормления (Шейда Е.В. и др., 2022). Одним из базовых условий эффективного ведения отрасли выступает обеспечение полноценного минерального питания (Соболева Н.В. и др., 2025a). Дефицит микронутриентов, включая незаменимые микроэлементы, ведет к развитию связанных с ним патологий, ограничивающих рентабельность производства (Соболева Н.В. и др., 2025b; Шейда Е.В. и др., 2024; Фролов А.Н. и Завьялов О.А., 2024). Коррекция минерального обмена позволяет снизить риски таких заболеваний и в ряде случаев оказывает стимулирующее действие на продуктивные качества животных (Zavyalov OA et al., 2025). Важнейшим микроэлементом, влияющим на иммунитет и здоровье, яв-

ляется селен (Завьялов ОА, 2023; Majors C et al., 2025). Оценить недостаток селена в организме можно по отклонению его содержания от нормы в рационе и биологических субстратах (например, в крови, моче, шерсти). Дефицит селена снижает активность селенозависимых ферментов, прежде всего глутатионпероксидазы, что приводит к накоплению продуктов перекисного окисления липидов и повреждению клеточных мембран. В результате ухудшается функция иммунной системы, возрастает заболеваемость маститами, задержанием последа и другими патологиями, что прямо или косвенно снижает молочную продуктивность и воспроизводство. Кроме того, при недостатке селена нарушается обмен тиреоидных гормонов и замедляются ростовые процессы, что негативно сказывается на приростах живой массы у молодняка и мясной продуктивности (Rezaei-Ahvanooei M et al., 2025). Селен проявляет свои биологические эффекты посредством вхождения в состав белковых молекул, среди которых доминируют соединения с антиоксидантными свойствами (Alfian A et al., 2025). Накопленные к настоящему времени данные подтверждают целесообразность использования селена в животноводческой практике: обогащение кормов для крупного рогатого скота этим элементом способствует повышению молочной продуктивности, ускорению роста животных и улучшению технологических качеств мяса. Безопасное обогащение рационов крупного рогатого скота селеном возможно до уровня 0,3-0,5 мг на 1 кг сухого вещества корма (в пересчете на добавленный селен). Превышение этой дозы, особенно свыше 1–2 мг/кг, создает риск развития токсичности, проявляющейся ломкостью копыт, выпадением волос, нарушением пищеварения, анемией и снижением продуктивности. Поэтому при обогащении кормов необходимо строго контролировать итоговое содержание селена, не избегая превышения максимально допустимых уровней. Однако до сих пор дискутируется вопрос о том, какие источники селена – органические или неорганические – являются более эффективными. Кроме того, недостаточная изученность фундаментальных основ воздействия селенопротеинов на кишечную микрофлору и их вклада в формирование продуктивных качеств не позволяет в полной мере реализовать потенциал селеносодержащих средств (Шейда Е.В. и др., 2024). Более того, в последние годы активно развивается направление, связанное с использованием наночастиц селена и селен-обогащенных пробиотиков, однако их сравнительная эффективность и механизмы действия на организм хозяина, в частности, через модуляцию оси «кишечник-печень» или «кишечник-молочная железа», остаются фрагментарно изученными (Завьялов О.А. и Медетов Е.С., 2024). Отсутствие системного подхода к анализу метаболизма селена с учетом его влияния на микробиом и продуктивные качества не позволяет разработать универсальные протоколы коррекции селенового статуса для разных видов и технологических групп животных.

Цель исследования.

Систематическое обобщение и анализ современных научных данных, посвященных изучению влияния селеносодержащих кормовых добавок на обмен селена (в том числе на экспрессию и функции селенопротеинов), продуктивные показатели и состав кишечной микробиоты у сельскохозяйственных животных.

Материалы и методы исследования.

Для достижения поставленной цели был проведен систематический обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных изучению влияния различных форм селеносодержащих добавок на обменные процессы, продуктивные показатели и микробиоценоз кишечника сельскохозяйственных животных. Поиск литературных источников осуществлялся в электронных базах данных РИНЦ (eLibrary.ru), PubMed, Scopus, Web of Science, ResearchGate. При формировании выборки использовались следующие ключевые слова и их комбинации на русском и английском языках: «селен», «селеносодержащие добавки», «органический селен», «наноселен», «селен-обогащенные пробиотики», «продуктивность», «микробиом кишечника», «селенопротеины», «крупный рогатый скот», «свиньи», «птица».

Результаты исследования и их обсуждение.

Современные представления о метаболизме селена и его формах. Для нормального функционирования организма млекопитающих, и крупного рогатого скота в частности, необходимо поступление селена, относящегося к группе незаменимых микроэлементов (металлоидов). Как свидетельствуют данные литературы, недостаточное содержание этого элемента в кормовых рационах провоцирует развитие характерных патологических синдромов (Mehdi Y et al., 2015). В этой связи возможность направленного воздействия на селеновый обмен у жвачных животных рассматривается как один из резервов повышения их продуктивного потенциала.

Многообразие физиологических эффектов, оказываемых селеном, напрямую связано с его интеграцией в молекулы селенопротеинов (Papp LV et al., 2010). Среди них выделяются глутатионпероксидаза (GPx), тиоредоксинредуктаза (TRxR) и метионинсульфоксид редуктаза (MsrA), основная функция которых заключается в нейтрализации окислительных процессов и регуляции редокс-чувствительных сигнальных путей (Mehdi Y and Dufrasne I, 2016). Особое место занимает селенопротеин P, совмещающий антиоксидантную защиту с транспортом и резервированием селена в тканях (Davis CD et al., 2012). Что касается других представителей этого семейства – селенопротеинов W, N и K, – то их функциональное предназначение на сегодняшний день исследовано фрагментарно (Abuelo A et al., 2016).

Несмотря на очевидную значимость селена для здоровья и продуктивности животных, особенности его метаболических превращений, а также закономерности функционирования селенопротеинов именно в организме крупного рогатого скота остаются слабо освещенными в научной литературе и требуют дальнейшего углубленного изучения. В частности, крайне мало данных о тканеспецифичной экспрессии селенопротеинов и их роли в регуляции липидного обмена, формировании колострального иммунитета или в процессах эмбриогенеза. Дискуссионным остается вопрос о наличии референтных интервалов содержания не только общего селена, но и отдельных селенопротеинов в сыворотке крови, что затрудняет интерпретацию результатов биохимического анализа и своевременную диагностику субклинических дефицитов. Анализ существующих источников показал, что референтные интервалы содержания селена в различных биосубстратах у крупного рогатого скота значительно варьируют, что обусловлено различиями в методах анализа, породных особенностях и региональных биогеохимических условиях. В сыворотке крови адекватный уровень обычно находится в диапазоне от 0,05 до 0,40 мкг/мл, что соответствует >140 нмоль/л; при этом референтные значения, рассчитанные для молочных коров черно-пестрой породы, составляют 0,53-2,26 мкмоль/л ($\approx 0,04$ -0,18 мкг/мл). В цельной крови адекватным считается уровень $\approx 0,020$ мкг/мл. В крови бычков в период откорма содержание селена варьирует в пределах 0,0383-0,0684 мг/л (Zavyalov OA et al., 2025). В печени нормальным считают содержание селена в диапазоне 1,2-2,0 мкг/г сухого вещества, а концентрация <600 нмоль/кг указывает на дефицит. В шерсти, по данным исследований, нормальные концентрации селена варьируют в зависимости от региона, породы и продуктивного направления. У коров мясного скота эти значения составляют 0,201-0,781 мкг/г (Miroshnikov SA et al., 2017), у высокопродуктивных молочных коров – 0,754-1,13 мкг/г (Miroshnikov SA et al., 2020). В качестве ориентира также можно использовать данные по лошадям: в шерсти жеребцов содержание селена находится в интервале 0,127-0,732 мкг/г, у кобыл – 0,075-0,119 мкг/г (Kalashnikov VV et al., 2019). Для пера цыплят-бройлеров референтные значения селена составляют 0,637-1,29 мг/кг (Lebedev S et al., 2022). Для кормовых рационов порог дефицита установлен на уровне $<0,1$ мг/кг сухого вещества, а содержание 0,2 мг/кг считается адекватным. Таким образом, референтные интервалы носят регионально-специфичный характер, что требует осторожности при интерпретации данных.

До настоящего времени остаются невыясненными фундаментальные аспекты взаимосвязи между распределением селена в организме (металломикой) и показателями мясной продуктивности, а также молекулярные механизмы, опосредующие эту связь. Для восполнения этих пробелов требуется внедрение современных аналитических стратегий, среди которых ключевое место занимают генетические методы и идентификация химических форм селена (специационный анализ).

Необходимость определения спектра селенсодержащих соединений как в кормовых средствах, так и в биологических тканях для корректной интерпретации физиологической роли микроэлемента обоснована в работе Li Q с соавторами (2024). Авторы связывают это с тем, что биологические эффекты селена зависят не только от его общего количества, но и от того, в какой именно химической форме он присутствует. Они подчеркивают, что разные формы селена различаются по усвояемости, биологическому действию и токсичности, поэтому анализа одного лишь валового содержания недостаточно. Кроме того, именно форма определяет, как селен распределяется в тканях и насколько он доступен для усвоения организмом, что имеет ключевое значение как для оценки эффективности разных селенсодержащих добавок, так и для разработки обоснованных протоколов обогащения продуктов питания. Обзор публикаций последних лет свидетельствует о крайне ограниченном объеме информации по данной проблематике. Отдельные исследовательские группы применяли хроматографические методы в комбинации с масс-спектрометрическим детектированием. Так, с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии, сопряженной с масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ВЭЖХ-ИСП-МС), в тканях бычков идентифицировали селеноцистеин, селенометионин (включая его окисленные формы), а также неорганические селенаты и селениты (Netto AS et al., 2014). В другом исследовании метод эксклюзионной хроматографии в сочетании с ICP-с-MS позволил зафиксировать перераспределение селеновых фракций в крови коров при введении в рацион селенизированных дрожжей; при этом было отмечено возрастание концентрации селенометионина и появление селенизированного гемоглобина (García-Vaquero M et al., 2011).

При анализе молочной продукции с использованием жидкостной хроматографии с ультрафиолетовым детектированием и гидрид-генерационной атомно-флуоресцентной спектрометрией (LC-UV-HG-AFS) выявлены различия в профиле селенсодержащих соединений в зависимости от источника микроэлемента. Преимущества органических форм селена перед неорганическими солями подтверждены многочисленными работами, что позволяет сделать обоснованный вывод об их большей эффективности. Так, метаанализ (Ceballos A et al., 2009), обобщивший данные 42 исследований за период с 1977 по 2007 год, показал, что у коров, получавших селен-дрожжи, концентрация селена в молоке в среднем была на 0,33 мкмоль/л выше, чем при использовании селенита/селената натрия. Более поздний анализ (Sun LL et al., 2019), также продемонстрировал, что органический селен обладает более высокой биодоступностью в крови, а селенометионин обеспечивает наиболее высокую скорость переноса селена в молоко: коэффициент переноса для селенометионина оказался на 47% выше, чем для селен-дрожжей. Эти данные хорошо согласуются с результатами других работ, в которых показано, что замена неорганического селена на органический значительно увеличивает содержание селена в молоке и улучшает его профиль (Muñiz-Naveiro O et al., 2007). Кроме того, в обзорной литературе отмечается, что использование органических форм селена в кормлении способствует лучшей передаче селена потомству через плаценту, молозиво и молоко, а также увеличивает содержание полиненасыщенных жирных кислот в молоке по сравнению с селенитом натрия (Mehdi Y and Dufrasne I, 2016).

Исследования, направленные на характеристику спектра селенопротеинов в сыворотке крови крупного рогатого скота, носят единичный характер. В частности, при сопоставлении эффективности неорганической (селенит натрия) и органической (селенизированные дрожжи) форм селена у бычков было установлено, что доминирующей селенсодержащей фракцией сыворотки выступает селенопротеин Р, тогда как вклад глутатионпероксидазы в общий пул селена минимален (Pereira ASC et al., 2012).

Новые источники органического селена: от дрожжей к бактериям и наночастицам. Традиционно в животноводстве для компенсации дефицита селена используются неорганические соли (селенит и селенат натрия). Однако их применение сопряжено с рядом недостатков, включая низкую биодоступность, узкое терапевтическое окно и потенциальную токсичность, обусловленную проокислительными свойствами. В связи с этим все большее внимание исследователей привлекают органические формы селена, которые обладают более высокой эффективностью абсорбции и

меньшей токсичностью (Завьялов О.А. и др., 2025). Наиболее изученным органическим источником являются селенизированные дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae*), способные аккумулировать селен преимущественно в форме селенометионина (SeMet), который включается в белки на месте метионина. Мета-анализы подтверждают, что замена неорганического селена на селен-дрожжи повышает его концентрацию в плазме, яйце и мясе птицы, а также улучшает антиоксидантный статус (Шейда Е.В. и др., 2021).

Перспективным направлением является использование селен-обогащенных бактерий, в частности пробиотических культур, таких как лактобациллы. Данный подход позволяет сочетать эффект органического селена с положительным влиянием пробиотика на здоровье кишечника (Силин Д. и др., 2025). Концепция «биофортифицированных бактерий» предполагает, что микроорганизмы, выращенные на среде с селеном, конвертируют его в органические формы (SeMet, SeCys), которые легче усваиваются макроорганизмами (Muhammad AI et al., 2025). В исследовании на курах-несушках было показано, что скормливание селен-обогащенных лактобацилл (SeL) в дозе 1.5 мг/кг улучшало конверсию корма и яйценоскость, а также повышало содержание селена в яйце, причем эффективность SeL была сопоставима или превосходила таковую у селеновых дрожжей (SeY) (Hefnawy A and Tortora-Perez J, 2010). Важно отметить, что SeL также модулировали состав микробиоты подвздошной кишки, увеличивая численность полезных лактобацилл и снижая количество потенциально патогенных энтеробактерий (Luo L et al., 2025).

Бактериальная конверсия селена может приводить к образованию наночастиц селена (SeNPs) непосредственно в клетках пробиотика, что делает такие «биогенные» наночастицы более биосовместимыми и стабильными по сравнению с химически синтезированными аналогами. Механизмы их усвоения и утилизации в кишечнике заметно отличаются, так как они могут высвобождаться постепенно, по мере лизиса бактериальных клеток, обеспечивая пролонгированный эффект (Wang L et al., 2024). Время удержания наночастиц селена в желудочно-кишечном тракте может значительно варьировать в зависимости от их размера, поверхностного покрытия и способа синтеза. Исследования *in vivo* с использованием биомедицинской визуализации показывают, что селеносодержащие наночастицы могут сохраняться в просвете кишечника до 48 часов (Mei J et al., 2026). Аналогичные данные получены на мышинных моделях, где сигналы от наночастиц SeMNPs регистрировались в кишечнике даже через 24 часа после перорального введения. Такая замедленная эвакуация объясняется уникальными физико-химическими свойствами наночастиц: в кислой среде желудка они могут образовывать крупные агрегаты (до 2400 нм), которые затем в щелочной среде кишечника вновь диспергируются, высвобождая селен для всасывания (Chen W et al., 2025). Благодаря бактериальным полисахаридам и белкам на поверхности, биогенные наночастицы надолго закрепляются на эпителии и медленно высвобождают селен, что делает его биодоступнее неорганических солей (Selmani A et al., 2024; Zhang J et al., 2022).

Независимо от способа доставки селена – в виде биогенных наночастиц, органических соединений или неорганических солей – ключевым этапом реализации его физиологических эффектов является всасывание в кишечнике, причем каждая химическая форма имеет собственные механизмы транспорта. Селенат (Se^{6+}) транспортируется через апикальную мембрану энтероцитов преимущественно Na^+ -зависимым механизмом, а также посредством анионного обмена, конкурируя с сульфатом и другими анионами (Wolffram S et al., 1988). Селенит (Se^{4+}) всасывается в основном путем непосредственной пассивной диффузии, хотя в некоторых отделах кишечника может наблюдаться и Na^+ -зависимый компонент (Wolffram S et al., 1986). Важную роль в абсорбции селенита играет внутриклеточный глутатион, способствующий его метаболизму (Ardüser F et al., 1985). Селенометионин (SeMet), являясь аналогом метионина, всасывается с помощью активного транспорта через систему аминокислотных переносчиков, в первую очередь через систему $\text{b}^0, + \text{rBAT}$ и B^0 (Nickel A et al., 2009). Селеноцистеин (SeCys) эффективно транспортируется системой $\text{b}^0, + \text{rBAT}$, а также может служить субстратом для глутаматных транспортеров EAAT2 и EAAT3 (Nickel A et al., 2009).

Еще одной инновационной формой являются наночастицы селена (SeNPs). Благодаря высокому соотношению площади поверхности к объему, они обладают уникальной биологической активностью. Исследования показывают, что SeNPs эффективно повышают яйценоскость, активность антиоксидантных ферментов (Т-АОС, SOD) и экспрессию соответствующих генов (SOD1, SOD2, GPX2) в яичнике кур, демонстрируя преимущества перед неорганическим селенитом натрия (Malik Z et al., 2025). При этом важно подчеркнуть, что физико-химические характеристики SeNPs (размер, форма, тип стабилизатора) критически влияют на их биодоступность и потенциальную токсичность. Мелкие частицы (<50 нм) могут проникать через гликокаликс и активнее взаимодействовать с энтероцитами, тогда как крупные агрегаты могут выводиться транзитом. В связи с этим стандартизация протоколов синтеза и характеристики SeNPs является необходимым условием для получения воспроизводимых научных результатов.

Селен и продуктивные качества сельскохозяйственных животных. Вопрос о целесообразности коррекции селенового статуса мясного скота с целью повышения его продуктивности неоднократно поднимался в литературе (Schöne F et al., 2013; Завьялов О.А. и Слепцов И.И., 2023). Однако эмпирический материал, напрямую увязывающий концентрацию этого микроэлемента в организме с динамикой привесов и органолептическими и физико-химическими параметрами мяса, представлен фрагментарно и зачастую носит противоречивый характер. В пользу положительного влияния селена свидетельствуют, например, данные о том, что в географических зонах с его дефицитом селенизированная люцерна увеличивала содержание селена в крови и ускоряла рост телят (Żarczyńska K et al., 2013). Вместе с тем глубина анализа в ряде работ остается недостаточной. Так, в другом исследовании (Salles MSV et al., 2014) селен применяли у телят с диарейным синдромом не для стимуляции роста, а для иммунокоррекции, поскольку диарея сопровождается окислительным стрессом. Авторы оценивали общий селен в сыворотке крови и иммунные тесты (фагоцитарную и оксидативную активность), но не определяли глутатионпероксидазу или селенопротеин Р, хотя SELENOP рекомендован как более точный биомаркер селенового статуса. Более убедительные результаты получены в работе итальянских ученых: подтверждена роль селена в оптимизации ростовых процессов, укреплении иммунной защиты (в частности, снижении заболеваемости респираторными инфекциями) и нормализации антиоксидантного статуса у молодняка крупного рогатого скота в фазу адаптации (Sgoifo Rossi CA et al., 2017).

Диагностически значимым представляется факт более низкого содержания селена в сыворотке гипотрофичных коров, что, по всей видимости, детерминировано его дефицитом в кормовой базе (менее 0,2 мкг/г) и может рассматриваться в качестве прогностического маркера вероятности развития дегенеративных изменений мышечной ткани у потомства (Michigan State University Extension, 2024). Дефицит селена в первую очередь поражает мышечную ткань, что обусловлено высокой метаболической активностью миоцитов и их зависимостью от селенозависимой антиоксидантной защиты. Классическим проявлением тяжелого селенодефицита у молодняка крупного рогатого скота является алиментарная мышечная дистрофия, характеризующаяся дегенерацией скелетной и сердечной мышцы. Напротив, изолированное поражение нервной ткани при недостатке селена встречается значительно реже и обычно требует сочетанного дефицита витамина Е. Ключевая роль селена в поддержании целостности мышц связана, в частности, с селенопротеином W (SELENOW), который активно экспрессируется в мышечной ткани и участвует в защите от окислительного стресса, а также в процессах роста и регенерации миофибрилл. Поэтому низкое содержание селена в сыворотке гипотрофичных коров является прогностически значимым маркером именно риска мышечной дистрофии у потомства, а не нервных нарушений (Colque Caro L et al., 2024).

Наряду с влиянием на мышечную ткань, селен играет важную роль в эндокринной регуляции, однако его эффекты на функцию щитовидной железы у жвачных изучены хуже и не всегда однозначны. Введение в рацион стельных коров кормов с повышенным содержанием селена (в составе солевых добавок и комбикормов) индуцировало рост активности глутатионпероксидазы в крови новорожденных телят, однако не затронуло концентрацию гормонов щитовидной железы (Rezaei-Ahvanooei M et al., 2025). Отсутствие изменений, скорее всего, было вызвано тем, что в

данной работе оценивался только общий пул гормонов, а не их биологически активные фракции. Более того, известно, что при дефиците йода активность селен-зависимых дейодиназ (ферментов, превращающих тироксин (T_4) в активный трийодтиронин (T_3)) может возрастать в 10-12 раз для компенсации нехватки «сырья». В такой ситуации добавки селена уже не могут влиять на уровень T_4/T_3 , так как он лимитирован йодом, а не селеном. Однако они способны поддерживать функцию глутатионпероксидазы в других тканях, что и было зафиксировано авторами.

Ряд экспериментальных данных не подтверждают существенного влияния экзогенного селена на привесы и мясные кондиции бычков, фиксируя лишь повышение его содержания в органах и тканях. При изучении мяса бельгийской голубой породы корреляции между аккумуляцией селена и показателями нежности (тендерности) мяса не обнаружено. Сопоставление эффективности селенизированных дрожжей и неорганического селенита натрия у бычков показало высокое преимущество органической формы в плане депонирования микроэлемента в мышечной ткани, однако различий в устойчивости мяса к окислительной порче выявлено не было (Grossi S et al., 2021). Сочетанное применение селена и меди в рационах абердин ангусской породы способствовало редукции холестерина в мышечной ткани и улучшению показателей конверсии корма. Исследование (Dalia AM et al., 2017) выявило наличие взаимосвязи между уровнем селена в мясе и редокс-соотношением глутатиона (окисленная и восстановленная формы), а также содержанием холестерина. Приведенные данные позволяют констатировать, что совокупность сведений по влиянию селена на продукционный потенциал крупного рогатого скота и качественные характеристики говядины остается ограниченной и неоднозначной. Подобная вариабельность результатов, вероятно, обусловлена гетерогенностью исходного селенового статуса подопытных животных, спецификой базовых рационов (присутствие антагонистов, таких как сера, или синергистов, например, витамина E), а также породоспецифичными особенностями метаболизма.

В противоположность этому для других видов сельскохозяйственных животных (свиньи, кролики, птица) накоплен более обширный материал, подтверждающий положительную роль селена в повышении продуктивности и улучшении качества мяса. В частности, при сравнении различных химических форм селена отмечено превосходство органических соединений в оптимизации свойств свинины, ассоциированных с уровнем pH (Zhao Z et al., 2016). Что касается механизмов действия, селен регулирует липидный обмен через влияние на ферменты синтеза и окисления жирных кислот. Ключевую роль играет глутатионпероксидаза 1 (GPX1), модулирующая экспрессию гена *Elovl3*, участвующего в синтезе длинноцепочечных жирных кислот (Sun Z et al., 2023). Другой механизм связан с селенопротеином S (SELENOS), активирующим липогенез в печени (Zhang DG et al., 2022). Помимо синтеза селен также влияет на липолиз, повышая экспрессию антилипидического гена *G0S2* и снижая экспрессию моноацилглицероллипазы *MGLL* (Корро К et al., 2013). Кроме того, добавки селена снижают содержание холестерина в мясе, что объясняется угнетением активности ГМГ-КоА-редуктазы. Наконец, селен может быть кофактором микросомальной десатуразной системы, влияя на превращение насыщенных жирных кислот в мононенасыщенные (Fetroudj A et al., 2026). Таким образом, селен воздействует на синтез жирных кислот и холестерина, липолиз и десатурацию.

Исследования показывают, что применение селен-обогащенных пробиотиков является эффективной стратегией для стимуляции роста поросят в условиях теплового стресса и может рассматриваться в качестве перспективной альтернативы антибиотикам. Положительный эффект от их применения при высоких температурах окружающей среды обусловлен несколькими ключевыми механизмами. Во-первых, добавка SP значительно повышает концентрацию селена в тканях, что ведет к росту активности и экспрессии мРНК ключевого антиоксидантного фермента глутатионпероксидазы-1, помогая животным бороться с окислительным стрессом, вызванным гипертермией. Во-вторых, тепловой шок приводит к усиленной экспрессии генов белков теплового шока, что служит маркером клеточного повреждения. Включение в рацион селен-обогащенных пробиотиков способствует значительному снижению уровня мРНК и белков теплового шока. Более того, селен-обогащенные пробиотики демонстрируют наивысшую эффективность по сравнению с отдельным

применением пробиотиков или селенита натрия, что подтверждает синергический эффект от объединения двух компонентов в одной добавке (Gan F et al., 2013).

В кролиководстве включение селена в дозировке 0,08-0,70 мг/кг сопровождалось достоверным увеличением привесов и улучшением конверсии корма (Rehman R et al., 2022). Дополнительно отмечено, что селен, особенно в комбинации с витамином Е, оптимизирует антиоксидантный статус, тормозит окислительную порчу мяса и стимулирует иммунную реактивность (Sheweita S et al., 2022).

В птицеводстве скормливание селенизированных дрожжей бройлерам существенно улучшает конверсию корма и продуктивные характеристики, при этом эффективность органической формы выше, чем селенита натрия (Khalifa OA et al., 2021), а выраженность эффекта коррелирует с длительностью применения и дозой (Xu X et al., 2022). Зафиксировано также улучшение цветовых характеристик мяса, что вероятно связано с активностью глутатионпероксидазы и более выраженным эффектом при использовании органических форм (Yang X et al., 2022). Сравнительный анализ различных форм (селенит натрия, селеновые дрожжи, селенометионин, наночастицы) на китайских шелковистых курах выявил максимальную эффективность органических соединений и наночастиц в отношении антиоксидантной защиты и мясных качеств (Soliman ES et al., 2020). Установлено, что тепловой стресс у бройлеров снижает привесы вследствие иммунных дисфункций и инволюции лимфоидной ткани, тогда как селен проявляет иммунопротекторные свойства и улучшает использование корма (Elgendey F et al., 2022). Вместе с тем существуют исследования, не подтвердившие статистически значимого влияния селеносодержащих дрожжей или хлореллы на привесы и мясные качества бройлеров (Chen S et al., 2022).

Резюмируя, следует подчеркнуть, что, несмотря на наличие обширных данных, демонстрирующих влияние селена на продуктивность разных видов, ни в одной из рассмотренных работ не проведено углубленного анализа взаимосвязи между особенностями метаболизма селена и селенопротеинов (за исключением определения активности глутатионпероксидазы) и итоговыми продуктивными показателями.

Взаимосвязь метаболизма селена и микробиома кишечника. Помимо общеизвестного влияния селена на окислительно-восстановительный гомеостаз и воспалительные реакции, в современных исследованиях все больше внимания уделяется его взаимодействию с кишечным микробиомом. С одной стороны, кишечная микрофлора выступает в качестве модулятора экспрессии селенопротеинов, опосредуя изменения их активности при поступлении селена (Liang S et al., 2024). С другой стороны, микробиота принимает участие в элиминации избыточных количеств микроэлемента путем синтеза метилированных производных (Jiang Z et al., 2024), а также в процессах биотрансформации его наночастиц. Кишечные бактерии, обладающие селен-зависимыми редуктазами, могут восстанавливать неорганические формы селена до элементного селена, который затем включается в бактериальные белки или выводится. Этот процесс не только снижает потенциальную токсичность селенита, но и создает пул «микробного» селена, доступного для всасывания в толстом отделе кишечника, где абсорбционная способность хозяина ниже. В свою очередь, селен проявляет пребиотическую активность в отношении нормальной микрофлоры, стимулирует ферментирующую активность микрофлоры рубца (Ying Z et al., 2025). Установлено, что наночастицы селена увеличивают численность бактерий родов *Lactobacillus* и *Faecalibacterium*, благоприятно влияющих на рубцовое пищеварение (Bamigbade GB et al., 2025). Селен также стимулирует рост бифидобактерий. Скармливание телятам люцерны, обогащенной селеном, способствовало увеличению биоразнообразия микробиоты носоглотки, что может служить фактором снижения риска развития респираторных заболеваний (Qiao L et al., 2023).

Влияние селенового обмена распространяется на микробные популяции различных экологических ниш организма, что может служить одним из объяснений его положительной роли в повышении продуктивности крупного рогатого скота. Помимо модуляции микробного сообщества, дополнительное введение селена в рационы сельскохозяйственных животных и птицы сопровождается укреплением барьерных свойств кишечной стенки, что особенно выражено у бройлеров и свиней при воздействии высоких температур (Noruzi S et al., 2022). Защитные эффекты селена рас-

пространяются и на морфологию кишечника, в частности, при реовирусной инфекции он предотвращает повреждение ворсинчатого эпителия (Ahmed Z et al., 2016). Экспериментальные модели *in vitro* и на живых объектах подтверждают значимость селенопротеинов для жизнедеятельности эритроцитов, обеспечения прочности межклеточных соединений и сдерживания воспалительных каскадов (Shabani R et al., 2019). В качестве обобщающего критерия, отражающего как состояние микробиоценоза, так и проницаемость кишечного барьера, рассматривается концентрация липополисахарида в кровеносном русле (Tong C et al., 2020). Превышение пороговых значений липополисахарида закономерно сопряжено с нарушениями иммунного статуса, активизацией свободнорадикальных процессов и ухудшением товарных и потребительских свойств мясной продукции (Boostani A et al., 2015). Экспериментально подтверждено, что селен способен блокировать сигнальные пути воспаления, инициируемого липополисахаридом, в клеточных культурах и тканях крупного рогатого скота, свиней и птицы (Singh VP et al., 2016). При этом исследования, направленные на выявление корреляции между обеспеченностью селеном и уровнем липополисахарида у крупного рогатого скота, в научной литературе не представлены, что является важным пробелом.

Новые данные о влиянии различных форм селена на микробиом и метаболизм углубляют понимание оси «микробиом–метаболизм». В работе Li D с соавторами (2025) проведено сравнительное изучение влияния наноселена (SeN), селенометионина (SeM) и селен-дрожжей (SeY) на кур-несушек. Результаты показали, что все три органические формы в дозе 0,4 мг/кг превосходили неорганический селенит натрия по влиянию на яйценоскость и антиоксидантный статус яичника. При этом каждая форма оказывала специфическое воздействие на микробиом слепой кишки: SeN и SeM увеличивали относительное содержание *Prevotella* и *Treponema* – бактерий, участвующих в ферментации сложных углеводов; SeY специфически повышал численность *Akkermansia*, *Olsenella* и *Romboutsia*. *Akkermansia* известна своей ролью в поддержании целостности кишечного барьера и обратно коррелирует с метаболическими нарушениями. Эти данные показывают, что выбор формы селена – это не просто вопрос биодоступности, но и инструмент направленной модуляции микробиоты. Улучшение продуктивных показателей и функции яичников при скормливания органического селена опосредовано изменениями в составе кишечной микробиоты и связанными с ними сдвигами в метаболизме липидов и антиоксидантной защите. Подчеркивается, что усвояемость селена зависит не только от его химической формы, но и от путей введения, что тесно связано с активностью микробиоты (Wang X et al., 2025). Таким образом, формируется замкнутый круг: микробиота преобразует селен, изменяя его доступность для хозяина, а селен, в свою очередь, изменяет состав и метаболическую активность микробиоты. Изучение этой связи является ключом к пониманию индивидуальных расхождений в ответе организма животных на селеновые добавки.

Заключение.

Таким образом, анализ современного состояния исследований выявил следующие пробелы и перспективные направления: отсутствуют системные данные о распределении селена и роли селенопротеинов у КРС, особенно в контексте репродуктивной функции и эмбриогенеза, где животные наиболее уязвимы к окислительному стрессу; слабо изучены взаимосвязи селена с другими металлами (Zn, Cu) и их совместное влияние на кишечный микробиом и иммунитет. Однако данные, полученные на птице, подтверждают, что органические и наноформы селена способны модулировать микробиоту в сторону улучшения метаболизма хозяина; использование селенообогащенных пробиотиков и наночастиц является перспективным направлением, а будущие исследования должны быть направлены на изучение их долгосрочных эффектов, влияния на потомство и разработку безопасных технологических регламентов применения.

Список источников

1. Адаптационные процессы в пищеварительной системе при введении ультрадисперсных частиц железа в жировые рационы крупного рогатого скота / Е.В. Шейда, С.В. Лебедев,

С.А. Мирошников, В.В. Гречкина, О.В. Шошина // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 2. С. 328-342. [Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Shoshina OV. Adaptive responses of cattle digestive system as influenced by dietary ultrafine iron particles combined with fat diets. Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]. 2022;57(2):328-342. (In Russ.). doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328rus doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328eng]

2. Апробация технологии повышения продуктивных качеств крупного рогатого скота путем оценки и коррекции элементного статуса / О.А. Завьялов, Е.С. Медетов, Ф.С. Амиршоев, А.М. Гулюкин // Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 3. С. 8-20. [Zavyalov OA, Medetov ES, Amirshoev FS, Gulukin AM. Testing technology for improving the productive qualities of cattle by assessing and correcting the elemental status. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(3):8-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-3-8>]

3. Влияние добавок магния в рацион дойных коров на физиологическое состояние и продуктивность в летний период / Н.В. Соболева, Г.К. Дускаев, Е.В. Шейда, О.В. Кван, Ш.Г. Рахматуллин // Кормопроизводство. 2025а. № 4. С. 47-54. [Soboleva NV, Duskaev GK, Sheida EV, Kvan OV, Rakhmatullin ShG. Effect of magnesium additives in the diet of dairy cows on their physiological state and productivity in the summer. Kormoproizvodstvo. 2025a;4:47-54. (In Russ.). doi: 10.30906/1562-0417-2025-4-47-54]

4. Влияние магнийсодержащих добавок на физиологическое состояние и молочную продуктивность коз нубийской породы / Н.В. Соболева, Г.К. Дускаев, Е.В. Шейда, О.В. Кван, Ш.Г. Рахматуллин // Ветеринария и кормление. 2025б. № 4. С. 96-99. [Soboleva NV, Duskaev GK, Sheida EV, Kvan OV, Rakhmatullin ShG. The effect of magnesium-containing additives on the physiological state and milk productivity of Nubian goats. Veterinaria i kormlenie. 2025b;4:96-99. (In Russ.). doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2025-4-21]

5. Дускаев Г.К. Анализ современного состояния мясного скота России // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2024. № 116. С. 244-250. [Duskaev GK. Analysis of the current Russian beef cattle state. Proceedings of the Kuban State Agrarian University. 2024;116:244-250. (In Russ.). doi: 10.21515/1999-1703-116-244-250]

6. Завьялов О.А. Влияние селенсодержащих добавок на метаболизм селена, продуктивные качества и микробиом кишечника у сельскохозяйственных животных (обзор) // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 95-100. [Zav'yalov OA. The effect of selenium supplements on selenium metabolism, performance and intestinal microbiome in farm animals (review). The Agrarian Scientific Journal. 2023;12:95-100. (In Russ.). doi: 10.28983/asj.y2023i12pp95-100]

7. Завьялов О.А., Медетов Е.С. Возрастные особенности и справочные интервалы концентраций основных эссенциальных и токсичных элементов в шерсти высокопродуктивных бычков абердин-ангусской породы // Пермский аграрный вестник. 2024. № 1(45). С. 71-78. [Zav'yalov OA, Medetov ES. Age peculiarities and reference intervals for concentrations of major essential and toxic elements in the wool of highly productive Aberdeen-angus bulls. Perm Agrarian Journal. 2024;1(45):71-78. (In Russ.). doi: 10.47737/2307-2873_2024_45_71]

8. Завьялов О.А., Слепцов И.И. Влияние коррекции концентраций селена и цинка в семенной жидкости на элементный состав, антиоксидантный статус и качественные характеристики спермы быков-производителей // Пермский аграрный вестник. 2023. № 3(43). С. 74-82. [Zavyalov OA, Sleptsov II. The effect of correction of selenium and zinc concentrations in seminal fluid on the elemental composition, antioxidant status and qualitative characteristics in sperm of servicing bulls. Perm Agrarian Journal. 2023;3(43):74-82. (In Russ.). doi: 10.47737/2307-2873_2023_43_74]

9. Изменение показателей крови цыплят-бройлеров при различной нутриентной обеспеченности рациона / Е.В. Шейда, Ш.Г. Рахматуллин, С.В. Лебедев, В.В. Гречкина, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 4. С. 193-204. [Sheida EV, Rakhmatullin ShG, Lebedev SV, Grechkina VV, Zavyalov OA, Frolov AN. Changes in blood parameters of broiler chickens with different nutritional security of the diet. Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(4):193-204. (In Russ.). doi: 10.33284/2658-3135-104-4-12]

10. Краткий обзор систем производства говядины в России и мире (обзор) / Г.К. Дускаев, А.В. Харламов, Г.И. Левахин, Е.А. Ажмулдинов, Х.А. Амерханов, С.А. Мирошников, А.Ф. Рысаев // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 78-94. [Duskaev GK, Kharlamov AV, Levakhin GI, Azhmuldinov EA, Amerkhanov KhA, Miroshnikov SA, Rysaev AF. Brief overview of beef production systems in Russia and the world (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):78-94. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-3-78
11. Роль органических комплексов минеральных элементов в метаболизме рубца жвачных / Е.В. Шейда, Г.К. Дускаев, С.А. Мирошников, И.С. Мирошников, О.В. Кван // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2024. Т. 27. № 11. С. 65-71. [Sheida EV, Duskaev GK, Miroshnikov SA, Miroshnikov IS, Kvan OV. The role of organic complexes of mineral elements in the metabolism of ruminant rumen. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2024;27(11):65-71. (*In Russ.*)]. doi: 10.29296/25877313-2024-11-08
12. Силин Д.А., Петруша Ю.К., Лебедев С.В. Влияние комплекса пробиотика и комплексах хелатных форм микроэлементов на зоотехнические показатели, переваримость питательных веществ и микробиом кур-несушек // Ветеринария и кормление. 2025. № 6. С. 105-108. [Silin DA, Petrusha YuK, Lebedev SV. The effect of a complex of probiotics chelated forms of trace elements on zootechnical parameters, nutrient digestibility and microbiome of laying. *Veterinaria i kormlenie*. 2025;6:105-108. (*In Russ.*)]. doi: 10.30917/TT-VK-1814-9588-2025-6-21
13. Фролов А.Н., Завьялов О.А. Влияние сезона года на элементный статус и продуктивные качества бычков // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107. № 4. С. 31-40. [Frolov AN, Zavyalov OA. The influence of season on the elemental status and productive qualities of bulls. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):31-40. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-107-4-31
14. Abuelo A, Alves-Nores V, Hernandez J, Muiño R, Benedito JL, Castillo C. Effect of par-enteral antioxidant supplementation during the dry period on postpartum glucose tolerance in dairy cows. *Journal of Veterinary Internal Medicine*. 2016;30(3):892-898. doi: 10.1111/jvim.13922
15. Ahmed Z, Malhi M, Soomro SA, Gandahi JA, Arijio A, Bhutto B. Dietary selenium yeast supplementation improved some villi morphological characteristics in duodenum and jejunum of young goats. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 2016;26(2):382-387.
16. Alfian A, Yusuf M, Ako A, Toleng L, Diansyah A, Amrullah M, Rahmat R, Hasrin H. The effects of mineral mix supplementation on reproductive performance of Bali bulls. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*. 2025;1-8. doi: 10.21608/ejvs.2025.335655.2502
17. Ardüser F, Wolffram S, Scharrer E. Active absorption of selenate by rat ileum. *The Journal of Nutrition*. 1985;115(9):1203-1208. doi: 10.1093/jn/115.9.1203
18. Bamigbade GB, et al. Selenium nanoparticles stabilized by date pulp polysaccharides: bioactivities, gut microbiota modulation and short chain fatty acids production. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;332(Pt 2):148387. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.148387
19. Boostani A, Sadeghi AA, Mousavi SN, Chamani M, Kashan N. Effects of organic, inorganic, and nano-Se on growth performance, antioxidant capacity, cellular and humoral immune responses in broiler chickens exposed to oxidative stress. *Livestock Science*. 2015;178:330-336. doi: 10.1016/j.livsci.2015.05.004
20. Ceballos A, Sánchez J, Stryhn H, Montgomery JB, Barkema HW, Wichtel JJ. Meta-analysis of the effect of oral selenium supplementation on milk selenium concentration in cattle. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(1):324-342. doi: 10.3168/jds.2008-1545
21. Chen S, Xue Y, Shen Y, Ju H, Zhang X, Liu J, Wang Y. 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. *Poultry Science*. 2022;101(3):101664. doi: 10.1016/j.psj.2021.101664

22. Chen W, Zhu H, Deng R, Qiao Y, Ruan Q, Zhang J, Zhang Y, Niu Y, Xu H, Cao W. Modified melanin for intestinal radioprotection via oral administration. *Cell Biomaterials*. 2025;1(11):100214. doi: 10.1016/j.celbio.2025.100214
23. Colque Caro L, Medina D, Avellaneda-Cáceres A, Aguirre L, Sandoval G, Micheloud J. Acute nutritional muscular dystrophy and mortality associated with selenium deficiency in artificial rearing of dairy calves in Salta, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 2024;2:86478736010. doi: 10.58149/thjm-sw46
24. Dalia AM, Loh TC, Sazili AQ, Jahromi MF, Samsudin AA. The effect of dietary bacterial organic selenium on growth performance, antioxidant capacity, and selenoproteins gene expression in broiler chickens. *BMC Veterinary Research*. 2017;13(1):254. doi: 10.1186/s12917-017-1159-4
25. Davis CD, Tsuji PA, Milner JA. Selenoproteins and cancer prevention. *Annual Review of Nutrition*. 2012;32:73-95. doi: 10.1146/annurev-nutr-071811-150740
26. Elgendey F, Al Wakeel RA, Hemeda SA, Elshwash AM, Fadl SE, Abdelazim AM, Alhujaily M, Khalifa OA. Selenium and/or vitamin E upregulate the antioxidant gene expression and parameters in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2022;18(1):310. doi: 10.1186/s12917-022-03411-4
27. Ferroudj A, El-Ramady H, Prokisch J. Applications of nano-selenium in the poultry industry: an overview. *Nanomaterials*. 2026;16(2):142. doi: 10.3390/nano16020142
28. Gan F, Ren F, Chen X, Lv C, Pan C, Ye G, Shi J, Shi X, Zhou H, Shituleni SA, Huang K. Effects of selenium-enriched probiotics on heat shock protein mRNA levels in piglet under heat stress conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013;61(10):2385-2391. doi: 10.1021/jf300249j
29. García-Vaquero M, López-Alonso M, Benedito JL, Hernández J, Gutiérrez B, Miranda M. Influence of Cu supplementation on toxic and essential trace element status in intensive reared beef cattle. *Food and Chemical Toxicology*. 2011;49(12):3358-3366. doi: 10.1016/j.fct.2011.09.013
30. Grossi S, Rossi L, De Marco M, Sgoifo Rossi CA. The effect of different sources of selenium supplementation on the meat quality traits of young Charolaise bulls during the finishing phase. *Antioxidants*. 2021;10(4):596. doi: 10.3390/antiox10040596
31. Hefnawy AE, Tortora-Perez JL. The importance of selenium and the effects of its deficiency in animal health. *Small Ruminant Research*. 2010;89(2-3):185-192. doi: 10.1016/j.smallrumres.2009.12.042
32. Jiang Z, Wang Z, Zhao Y, Peng M. Unveiling the vital role of soil microorganisms in selenium cycling: a review. *Frontiers in Microbiology*. 2024;15:1448539. doi: 10.3389/fmicb.2024.1448539
33. Kalashnikov VV, Zajcev AM, Atroshchenko MM, Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Skalny AV. Assessment of gender effects and reference values of mane hair trace element content in English thoroughbred horses (North Caucasus, Russia) using ICP-DRC-MS. *Biological Trace Element Research*. 2019;191(2):382-388. doi: 10.1007/s12011-019-1634-9
34. Khalifa OA, Al Wakeel RA, Hemeda SA, Abdel-Daim MM, Albadrani GM, El Askary A, Fadl SE, Elgendey F. The impact of vitamin E and/or selenium dietary supplementation on growth parameters and expression levels of the growth-related genes in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2021;17(1):251. doi: 10.1186/s12917-021-02963-1
35. Koppo K, Valle C, Šiklová-Vítková M, Czudková E, de Glisezinski I, van de Voorde J, Langin D, Štich V. Expression of lipolytic genes in adipose tissue is differentially regulated during multiple phases of dietary intervention in obese women. *Physiological Research*. 2013;62(5):527-535. doi: 10.33549/physiolres.932483
36. Lebedev S, Zavyalov O, Frolov A. Age features and reference intervals for the concentrations of some essential and toxic elements in laying hens. *Veterinary World*. 2022;15(4):943-952. doi: 10.14202/vetworld.2022.943-952
37. Li D, Xie M, Fei D, Guang Y, Zhou Y. Different forms of selenium improve laying performance and ovarian antioxidant capacity: regulating gut microbiota and ovarian metabolism. *Poultry Science*. 2025;104(12):106081. doi: 10.1016/j.psj.2025.106081

38. Li Q, Li Y, Cong X, Chen S, Liu Y, Liu Y, Liu L, Yan Z, Wang Y. Distribution and bio-accessibility of selenium and selenium speciation in selenium-enriched piglets. *Food Bioscience*. 2024;58:103827. doi: 10.1016/j.fbio.2024.103827
39. Liang S, Yu J, Zhao M, Chen S, Lu X, Ye F, Chen J, Zhao G, Lei L. In vitro digestion and fecal fermentation of selenocompounds: impact on gut microbiota, antioxidant activity, and short-chain fatty acids. *Food Research International*. 2024;180:114089. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114089
40. Luo L, Hou X, Yi D, Deng G, Wang Z, Peng M. Selenium-enriched microorganisms: metabolism, production, and applications. *Microorganisms*. 2025;13(8):1849. doi: 10.3390/microorganisms13081849
41. Majors C, Myers A, Kasimanickam R. Selenium in cattle diseases and reproductive health. *Clinical Theriogenology*. 2025;17:12015. doi: 10.58292/CT.v17.12015
42. Malik Z, Marghazani I, Chachar B, Shah Q, Shah T, Mengal B, Ujjan N, Bilal M. Exploring the nutraceutical role of selenium nanoparticles on laying performance, egg attributes and immune response in laying hens. *Indus Journal of Bioscience Research*. 2025;3:524-531. doi: 10.70749/ijbr.v3i5.1365
43. Mehdi Y, Clinquart A, Hornick JL, Cabaraux JF, Istasse L, Dufrasne I. Meat composition and quality of young growing Belgian Blue bulls offered a fattening diet with selenium enriched cereals. *Canadian Journal of Animal Science*. 2015;95:465-473. doi: 10.4141/cjas-2014-114
44. Mehdi Y, Dufrasne I. Selenium in cattle: a review. *Molecules*. 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545
45. Mei J, Shi X, Chen M, Li Z, Cui Y, Fang C, Wu X, Chen X, Zeng K, Yang L. Chitosan/selenium nanoparticles Pickering emulsion prolong quercetin retention time to ameliorates cognitive disorder: Focus on restoring the metabolic disorder and gut microbiota. *Carbohydrate Polymers*. 2026;375:124804. doi: 10.1016/j.carbpol.2025.124804
46. Michigan State University Extension. White muscle disease caused by nutrient deficiency. *Western Livestock Journal*. 2024. [Internet] Available from: <https://www.wlj.net/white-muscle-disease-caused-by-nutrient-deficiency/> (cited 24 Feb 2026).
47. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Bolodurina IP, Skalny AV, Kalashnikov VV, Grabeklis AR, Tinkov AA. The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*). *Biological Trace Element Research*. 2017;180(1):56-62. doi: 10.1007/s12011-017-0991-5
48. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Skalny AV, Grabeklis AR. The reference values of hair content of trace elements in dairy cows of Holstein breed. *Biological Trace Element Research*. 2020;194(1):145-151. doi: 10.1007/s12011-019-01768-6
49. Muhammad AI, Dalia AAM, Hemly NIM, Zainudin NN, Samsudin AA. Biofortified bacteria: the role of selenium-enriched microorganisms in enhancing animal selenium uptake – a review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2025;109(6):1298-1320. doi: 10.1111/jpn.70001
50. Muñoz-Naveiro O, Domínguez-González R, Bermejo-Barrera A, Bermejo-Barrera P, Cocho JA, Fraga JM. 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. *Talanta*. 2007;71(4):1587-1593. doi: 10.1016/j.talanta.2006.07.040
51. Netto AS, Zanetti MA, Claro GR, de Melo MP, Vilela FG, Correa LB. Effects of copper and selenium supplementation on performance and lipid metabolism in confined Brangus bulls. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2014;27(4):488-494. doi: 10.5713/ajas.2013.13400
52. Nickel A, Kottra G, Schmidt G, Danier J, Hofmann T, Daniel H. Characteristics of transport of selenoamino acids by epithelial amino acid transporters. *Chemico-Biological Interactions*. 2009;177(3):234-241. doi: 10.1016/j.cbi.2008.09.008
53. 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. *Veterinary Medicine and Science*. 2022;8(3):1137-1145. doi: 10.1002/vms3.736

54. Papp LV, Holmgren A, Khanna KK. Selenium and selenoproteins in health and disease. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2010;12(7):793-795. doi: 10.1089/ars.2009.2973
55. Pereira ASC, Santos MVD, Aferri G, Corte RRPDS, De Freitas Júnior JE, Leme PR, Rennó FP. Lipid and selenium sources on fatty acid composition of intramuscular fat and muscle selenium concentration of Nellore steers. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2012;41:2357-2363. doi: 10.1590/S1516-35982012001100009
56. Qiao L, Dou X, Song X, Chang J, Zeng X, Zhu L, Yi H, Xu C. Replacing dietary sodium selenite with biogenic selenium nanoparticles improves the growth performance and gut health of early-weaned piglets. *Animal Nutrition*. 2023;15:99-113. doi: 10.1016/j.aninu.2023.08.003
57. Rehman R, Sial N, Ismail A, Hussain S, Abid S, Javed M, Nadeem K, Ayoub M. Growth response in *Oryctolagus cuniculus* to selenium toxicity exposure ameliorated with vitamin E. *BioMed Research International*. 2022;2022:8216685. doi: 10.1155/2022/8216685
58. Rezaei-Ahvanooei MR, Lamanna M, Colleluori R, Formigoni A, Norouzian MA, Assadi-Alamouti A, Cavallini D. Effects of microminerals on performance and metabolic adaptation in heat-stressed dairy cows: a review. *Biological Trace Element Research*. 2025;204:3504-3521. doi: 10.1007/s12011-025-04911-8
59. Salles MSV, Zanetti MA, Junior LCR, Salles FA, Azzolini AECS, Soares EM, Faccioli LH, Valim YML. Performance and immune response of suckling calves fed organic selenium. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;188:28-35. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2013.11.008
60. Schöne F, Steinhöfel O, Weigel K, Bergmann H, Herzog E, Dunkel S, Kirmse R, Leiterer M. Selenium in feedstuffs and rations for dairy cows including a view of the food chain up to the consumer. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*. 2013;8:271-280. doi: 10.1007/s00003-013-0827-y
61. Selmani A, Matijaković Mlinarić N, Falsone SF, Vidaković I, Leitinger G, Delač I, Radatović B, Nemet I, Rončević S, Bernkop-Schnürch A, Vuletić T, Kornmueller K, Roblegg E, Prassl R. Simulated gastrointestinal fluids impact the stability of polymer-functionalized selenium nanoparticles: physicochemical aspects. *International Journal of Nanomedicine*. 2024;19:13485-13505. doi: 10.2147/IJN.S483253
62. Sgoifo Rossi CA, Compiani R, Baldi G, Muraro M, Marden JP, Rossi R, Pastorelli G, Corino C, Dell'Orto V. Organic selenium supplementation improves growth parameters, immune and antioxidant status of newly received beef cattle. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 2017;26(2):100-108. doi: 10.22358/jafs/70765/2017
63. Shabani R, Fakhraei J, Yarahmadi HM, Seidavi A. Effect of different sources of selenium on performance and characteristics of immune system of broiler chickens. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2019;48:e20180256. doi: 10.1590/rbz4820180256
64. Sheweita SA, El-Dafrawi YA, El-Ghalid OA, Ghoneim AA, Wahid A. Antioxidants (selenium and garlic) alleviated the adverse effects of tramadol on the reproductive system and oxidative stress markers in male rabbits. *Scientific Reports*. 2022;12(1):13958. doi: 10.1038/s41598-022-16862-4
65. Singh VP, Sahu DS, Singh MK, Manoj J. Effect of supplementation of selenium and Ashwagandha (*Withania somnifera*) on some haematological and immunological parameters of broiler chickens. *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences*. 2016;3(6):406-410. doi: 10.21276/sjavs.2016.3.6.2
66. Soliman ES, Mahmoud FF, Fadel MA, Hamad RT. 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. *Veterinary World*. 2020;13(9):1780-1797. doi: 10.14202/vetworld.2020.1780-1797
67. Sun LL, Gao ST, Wang K, Xu JC, Sanz-Fernandez MV, Baumgard LH, Bu DP. Effects of source on bioavailability of selenium, antioxidant status, and performance in lactating dairy cows during oxidative stress-inducing conditions. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(1):311-319. doi: 10.3168/jds.2018-14974

68. Sun Z, Wu K, Feng C, Lei XG. Selenium-dependent glutathione peroxidase 1 regulates transcription of elongase 3 in murine tissues. *Free Radical Biology and Medicine*. 2023;208:708-717. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2023.09.010
69. Tong C, Peng L, Li-Hui Y, Lin L, Kang L, Yueli C. Selenium-rich yeast attenuates ochratoxin A-induced small intestinal injury in broiler chickens by activating the Nrf2 pathway and inhibiting NF- κ B activation. *Journal of Functional Foods*. 2020;66:103784. doi: 10.1016/j.jff.2020.103784
70. Wang L, Song L, Wang P, Zhang H, Li Y, Song J, Zhong L, Liu C, Zhang W, Wen P. Bioreduction of Se(IV) by *Lactiplantibacillus plantarum* NML21 and synthesis of selenium nanospheres Se(0). *Food Chemistry*. 2024;452: 139595. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.139595
71. Wang X, Zhong Y, Zhu Z, Zhang N, Chen X, Wang F, Wang L, Chen C, He J, Li S. Gut microbiota: a new perspective for bioavailability of selenium and human health. *npj Science of Food*. 2025;9(1): 228. doi: 10.1038/s41538-025-00589-3
72. Wolfram S, Anliker E, Scharrer E. Uptake of selenate and selenite by isolated intestinal brush border membrane vesicles from pig, sheep, and rat. *Biological Trace Element Research*. 1986;10(4):293-306. doi: 10.1007/BF02802397
73. Wolfram S, Grenacher B, Scharrer E. Transport of selenate and sulphate across the intestinal brush-border membrane of pig jejunum by two common mechanisms. *Quarterly Journal of Experimental Physiology*. 1988;73(1):103-111. doi: 10.1113/expphysiol.1988.sp003107
74. Xu X, Wei Y, Zhang Y, Jing X, Cong X, Gao Q, Cheng S, Zhu Z, Zhu H, Zhao J, Liu Y. A new selenium source from Se-enriched *Cardamine violifolia* improves growth performance, anti-oxidative capacity and meat quality in broilers. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:996932. doi: 10.3389/fnut.2022.996932
75. Yang X, Yang C, Tang D, Yu Q, Zhang L. Effects of dietary supplementation with selenium yeast and jujube powder on mitochondrial oxidative damage and apoptosis of chicken. *Poultry Science*. 2022;101(10):102072. doi: 10.1016/j.psj.2022.102072
76. Ying Z, Xie S, Xiu Z, Sun Y, Yang Q, Gao H, Fan W, Wu Y. Under heat stress conditions, selenium nanoparticles promote lactation through modulation of rumen microbiota and metabolic processes in dairy goats. *Scientific Reports*. 2025;15:9063. doi: 10.1038/s41598-025-93710-1
77. Żarczyńska K, Sobiech P, Radwińska J, Rękawek W. Effects of selenium on animal health. *Journal of Elementology*. 2013;18(2):329-340. doi: 10.5601/jelem.2013.18.2.12
78. Zavyalov OA, Medetov ES, Kurilkin YaY. Selenium and zinc supplements combined with methionine: effects on blood element profiles meat production and quality in Aberdeen-Angus bulls with selenium and zinc imbalance. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2025;18(2):216-235.
79. Zhang DG, Xu XJ, Pantopoulos K, Zhao T, Zheng H, Luo Z. HSF1-SELENOS pathway mediated dietary inorganic Se-induced lipogenesis via the up-regulation of PPAR γ expression in yellow catfish. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Gene Regulatory Mechanisms*. 2022;1865(3):194802. doi: 10.1016/j.bbagrm.2022.194802
80. Zhang J, Yang X, Ji T, Wen C, Ye Z, Liu X, Liang L, Liu G, Xu X. Digestion and absorption properties of *Lycium barbarum* polysaccharides stabilized selenium nanoparticles. *Food Chemistry*. 2022;373(Pt B):131637. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131637
81. Zhao Z, Barcus M, Kim J, Lum KL, Mills C, Lei XG. High dietary selenium intake alters lipid metabolism and protein synthesis in liver and muscle of pigs. *The Journal of Nutrition*. 2016;146(9):1625-1633. doi: 10.3945/jn.116.229955

References

1. Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Shoshina OV. Adaptive responses of cattle digestive system as influenced by dietary ultrafine iron particles combined with fat diets. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2022;57(2):328-342. doi: 10.15389/agrobiol.2022.2.328rus doi: 10.15389/agrobiol.2022.2.328eng

2. Zavyalov OA, Medetov ES, Amirshoev FS, Gulukin AM. Testing technology for improving the productive qualities of cattle by assessing and correcting the elemental status. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2025;108(3):8-20. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-3-8>
3. Soboleva NV, Duskaev GK, Sheida EV, Kvan OV, Rakhmatullin ShG. Effect of magnesium additives in the diet of dairy cows on their physiological state and productivity in the summer. *Feed Production*. 2025a;4:47-54. doi: 10.30906/1562-0417-2025-4-47-54
4. Soboleva NV, Duskaev GK, Sheida EV, Kvan OV, Rakhmatullin ShG. The effect of magnesium-containing additives on the physiological state and milk productivity of Nubian goats. *Veterinary medicine and feeding*. 2025b;4:96-99. doi: 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2025-4-21
5. Duskaev GK. Analysis of the current Russian beef cattle state. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024;116:244-250. doi: 10.21515/1999-1703-116-244-250
6. Zav'yalov OA. The effect of selenium supplements on selenium metabolism, performance and intestinal microbiome in farm animals (review). *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;12:95-100. doi: 10.28983/asj.y2023i12pp95-100
7. Zav'yalov OA, Medetov ES. Age peculiarities and reference intervals for concentrations of major essential and toxic elements in the wool of highly productive Aberdeen-angus bulls. *Perm Agrarian Journal*. 2024;1(45):71-78. doi: 10.47737/2307-2873_2024_45_71
8. Zavyalov OA, Sleptsov II. The effect of correction of selenium and zinc concentrations in seminal fluid on the elemental composition, antioxidant status and qualitative characteristics in sperm of servicing bulls. *Perm Agrarian Journal*. 2023;3(43):74-82. doi: 10.47737/2307-2873_2023_43_74
9. Sheida EV, Rakhmatullin ShG, Lebedev SV, Grechkina VV, Zavyalov OA, Frolov AN. Changes in blood parameters of broiler chickens with different nutritional security of the diet. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(4):193-204. doi:10.33284/2658-3135-104-4-12
10. Duskaev GK, Kharlamov AV, Levakhin GI, Azhmuldinov EA, Amerkhanov KhA, Miroshnikov SA, Rysaev AF. Brief overview of beef production systems in Russia and the world (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):78-94. doi:10.33284/2658-3135-105-3-78
11. Sheida EV, Duskaev GK, Miroshnikov SA, Miroshnikov IS, Kvan OV. The role of organic complexes of mineral elements in the metabolism of ruminant rumen. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2024;27(11):65-71. doi: 10.29296/25877313-2024-11-08
12. Silin DA, Petrusha YuK, Lebedev SV. The effect of a complex of probiotics chelated forms of trace elements on zootechnical parameters, nutrient digestibility and microbiome of laying. *Veterinary medicine and feeding*. 2025;6:105-108. doi: 10.30917/TT-VK-1814-9588-2025-6-21
13. Frolov AN, Zavyalov OA. The influence of season on the elemental status and productive qualities of bulls. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):31-40. doi: 10.33284/2658-3135-107-4-31
14. Abuelo A, Alves-Nores V, Hernandez J, Muiño R, Benedito JL, Castillo C. Effect of par- enteral antioxidant supplementation during the dry period on postpartum glucose tolerance in dairy cows. *Journal of Veterinary Internal Medicine*. 2016;30(3):892-898. doi: 10.1111/jvim.13922
15. Ahmed Z, Malhi M, Soomro SA, Gandahi JA, Arijio A, Bhutto B. Dietary selenium yeast supplementation improved some villi morphological characteristics in duodenum and jejunum of young goats. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 2016;26(2):382-387.
16. Alfian A, Yusuf M, Ako A, Toleng L, Diansyah A, Amrullah M, Rahmat R, Hasrin H. The effects of mineral mix supplementation on reproductive performance of Bali bulls. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*. 2025;1-8. doi: 10.21608/ejvs.2025.335655.2502
17. Ardüser F, Wolfram S, Scharrer E. Active absorption of selenate by rat ileum. *The Journal of Nutrition*. 1985;115(9):1203-1208. doi: 10.1093/jn/115.9.1203
18. Bamigbade GB, et al. Selenium nanoparticles stabilized by date pulp polysaccharides: bioactivities, gut microbiota modulation and short chain fatty acids production. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;332(Pt 2):148387. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.148387

19. Boostani A, Sadeghi AA, Mousavi SN, Chamani M, Kashan N. Effects of organic, inorganic, and nano-Se on growth performance, antioxidant capacity, cellular and humoral immune responses in broiler chickens exposed to oxidative stress. *Livestock Science*. 2015;178:330-336. doi: 10.1016/j.livsci.2015.05.004
20. Ceballos A, Sánchez J, Stryhn H, Montgomery JB, Barkema HW, Wichtel JJ. Meta-analysis of the effect of oral selenium supplementation on milk selenium concentration in cattle. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(1):324-342. doi: 10.3168/jds.2008-1545
21. Chen S, Xue Y, Shen Y, Ju H, Zhang X, Liu J, Wang Y. 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. *Poultry Science*. 2022;101(3):101664. doi: 10.1016/j.psj.2021.101664
22. Chen W, Zhu H, Deng R, Qiao Y, Ruan Q, Zhang J, Zhang Y, Niu Y, Xu H, Cao W. Modified melanin for intestinal radioprotection via oral administration. *Cell Biomaterials*. 2025;1(11):100214. doi: 10.1016/j.celbio.2025.100214
23. Colque Caro L, Medina D, Avellaneda-Cáceres A, Aguirre L, Sandoval G, Micheloud J. Acute nutritional muscular dystrophy and mortality associated with selenium deficiency in artificial rearing of dairy calves in Salta, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 2024;2:86478736010. doi: 10.58149/thjm-sw46
24. Dalia AM, Loh TC, Sazili AQ, Jahromi MF, Samsudin AA. The effect of dietary bacterial organic selenium on growth performance, antioxidant capacity, and selenoproteins gene expression in broiler chickens. *BMC Veterinary Research*. 2017;13(1):254. doi: 10.1186/s12917-017-1159-4
25. Davis CD, Tsuji PA, Milner JA. Selenoproteins and cancer prevention. *Annual Review of Nutrition*. 2012;32:73-95. doi: 10.1146/annurev-nutr-071811-150740
26. Elgendey F, Al Wakeel RA, Hemeda SA, Elshwash AM, Fadl SE, Abdelazim AM, Alhujaily M, Khalifa OA. Selenium and/or vitamin E upregulate the antioxidant gene expression and parameters in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2022;18(1):310. doi: 10.1186/s12917-022-03411-4
27. Ferroudj A, El-Ramady H, Prokisch J. Applications of nano-selenium in the poultry industry: an overview. *Nanomaterials*. 2026;16(2):142. doi: 10.3390/nano16020142
28. Gan F, Ren F, Chen X, Lv C, Pan C, Ye G, Shi J, Shi X, Zhou H, Shituleni SA, Huang K. Effects of selenium-enriched probiotics on heat shock protein mRNA levels in piglet under heat stress conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013;61(10):2385-2391. doi: 10.1021/jf300249j
29. García-Vaquero M, López-Alonso M, Benedito JL, Hernández J, Gutiérrez B, Miranda M. Influence of Cu supplementation on toxic and essential trace element status in intensive reared beef cattle. *Food and Chemical Toxicology*. 2011;49(12):3358-3366. doi: 10.1016/j.fct.2011.09.013
30. Grossi S, Rossi L, De Marco M, Sgoifo Rossi CA. The effect of different sources of selenium supplementation on the meat quality traits of young Charolaise bulls during the finishing phase. *Antioxidants*. 2021;10(4):596. doi: 10.3390/antiox10040596
31. Hefnawy AE, Tortora-Perez JL. The importance of selenium and the effects of its deficiency in animal health. *Small Ruminant Research*. 2010;89(2-3):185-192. doi: 10.1016/j.smallrumres.2009.12.042
32. Jiang Z, Wang Z, Zhao Y, Peng M. Unveiling the vital role of soil microorganisms in selenium cycling: a review. *Frontiers in Microbiology*. 2024;15:1448539. doi: 10.3389/fmicb.2024.1448539
33. Kalashnikov VV, Zajcev AM, Atroshchenko MM, Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Skalny AV. Assessment of gender effects and reference values of mane hair trace element content in English thoroughbred horses (North Caucasus, Russia) using ICP-DRC-MS. *Biological Trace Element Research*. 2019;191(2):382-388. doi: 10.1007/s12011-019-1634-9
34. Khalifa OA, Al Wakeel RA, Hemeda SA, Abdel-Daim MM, Albadrani GM, El Askary A, Fadl SE, Elgendey F. The impact of vitamin E and/or selenium dietary supplementation on growth parameters and expression levels of the growth-related genes in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2021;17(1):251. doi: 10.1186/s12917-021-02963-1

35. Koppo K, Valle C, Šiklová-Vítková M, Czudková E, de Glisezinski I, van de Voorde J, Langin D, Štich V. Expression of lipolytic genes in adipose tissue is differentially regulated during multiple phases of dietary intervention in obese women. *Physiological Research*. 2013;62(5):527-535. doi: 10.33549/physiolres.932483
36. Lebedev S, Zavyalov O, Frolov A. Age features and reference intervals for the concentrations of some essential and toxic elements in laying hens. *Veterinary World*. 2022;15(4):943-952. doi: 10.14202/vetworld.2022.943-952
37. Li D, Xie M, Fei D, Guang Y, Zhou Y. Different forms of selenium improve laying performance and ovarian antioxidant capacity: regulating gut microbiota and ovarian metabolism. *Poultry Science*. 2025;104(12):106081. doi: 10.1016/j.psj.2025.106081
38. Li Q, Li Y, Cong X, Chen S, Liu Y, Liu Y, Liu L, Yan Z, Wang Y. Distribution and bioaccessibility of selenium and selenium speciation in selenium-enriched piglets. *Food Bioscience*. 2024;58:103827. doi: 10.1016/j.fbio.2024.103827
39. Liang S, Yu J, Zhao M, Chen S, Lu X, Ye F, Chen J, Zhao G, Lei L. In vitro digestion and fecal fermentation of selenocompounds: impact on gut microbiota, antioxidant activity, and short-chain fatty acids. *Food Research International*. 2024;180:114089. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114089
40. Luo L, Hou X, Yi D, Deng G, Wang Z, Peng M. Selenium-enriched microorganisms: metabolism, production, and applications. *Microorganisms*. 2025;13(8):1849. doi: 10.3390/microorganisms13081849
41. Majors C, Myers A, Kasimanickam R. Selenium in cattle diseases and reproductive health. *Clinical Theriogenology*. 2025;17:12015. doi: 10.58292/CT.v17.12015
42. Malik Z, Marghazani I, Chachar B, Shah Q, Shah T, Mengal B, Ujjan N, Bilal M. Exploring the nutraceutical role of selenium nanoparticles on laying performance, egg attributes and immune response in laying hens. *Indus Journal of Bioscience Research*. 2025;3:524-531. doi: 10.70749/ijbr.v3i5.1365
43. Mehdi Y, Clinquart A, Hornick JL, Cabaraux JF, Istasse L, Dufrasne I. Meat composition and quality of young growing Belgian Blue bulls offered a fattening diet with selenium enriched cereals. *Canadian Journal of Animal Science*. 2015;95:465-473. doi: 10.4141/cjas-2014-114
44. Mehdi Y, Dufrasne I. Selenium in cattle: a review. *Molecules*. 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545
45. Mei J, Shi X, Chen M, Li Z, Cui Y, Fang C, Wu X, Chen X, Zeng K, Yang L. Chitosan/selenium nanoparticles Pickering emulsion prolong quercetin retention time to ameliorates cognitive disorder: Focus on restoring the metabolic disorder and gut microbiota. *Carbohydrate Polymers*. 2026;375:124804. doi: 10.1016/j.carbpol.2025.124804
46. Michigan State University Extension. White muscle disease caused by nutrient deficiency. *Western Livestock Journal*. 2024. [Internet] Available from: <https://www.wlj.net/white-muscle-disease-caused-by-nutrient-deficiency/> / (cited 24 Feb 2026).
47. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Bolodurina IP, Skalny AV, Kalashnikov VV, Grabeklis AR, Tinkov AA. The reference intervals of hair trace element content in Hereford cows and heifers (*Bos taurus*). *Biological Trace Element Research*. 2017;180(1):56-62. doi: 10.1007/s12011-017-0991-5
48. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Skalny AV, Grabeklis AR. The reference values of hair content of trace elements in dairy cows of Holstein breed. *Biological Trace Element Research*. 2020;194(1):145-151. doi: 10.1007/s12011-019-01768-6
49. Muhammad AI, Dalia AAM, Hemly NIM, Zainudin NN, Samsudin AA. Biofortified bacteria: the role of selenium-enriched microorganisms in enhancing animal selenium uptake – a review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2025;109(6):1298-1320. doi: 10.1111/jpn.70001
50. Muñiz-Naveiro O, Domínguez-González R, Bermejo-Barrera A, Bermejo-Barrera P, Cocho JA, Fraga JM. Selenium speciation in cow milk obtained after supplementation with different sele-

nium forms to the cow feed using liquid chromatography coupled with hydride generation-atomic fluorescence spectrometry. *Talanta*. 2007;71(4):1587-1593. doi: 10.1016/j.talanta.2006.07.040

51. Netto AS, Zanetti MA, Claro GR, de Melo MP, Vilela FG, Correa LB. Effects of copper and selenium supplementation on performance and lipid metabolism in confined Brangus bulls. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2014;27(4):488-494. doi: 10.5713/ajas.2013.13400

52. Nickel A, Kottra G, Schmidt G, Danier J, Hofmann T, Daniel H. Characteristics of transport of selenoamino acids by epithelial amino acid transporters. *Chemico-Biological Interactions*. 2009;177(3):234-241. doi: 10.1016/j.cbi.2008.09.008

53. 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. *Veterinary Medicine and Science*. 2022;8(3):1137-1145. doi: 10.1002/vms3.736

54. Papp LV, Holmgren A, Khanna KK. Selenium and selenoproteins in health and disease. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2010;12(7):793-795. doi: 10.1089/ars.2009.2973

55. Pereira ASC, Santos MVD, Aferri G, Corte RRPDS, De Freitas Júnior JE, Leme PR, Rennó FP. Lipid and selenium sources on fatty acid composition of intramuscular fat and muscle selenium concentration of Nellore steers. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2012;41:2357-2363. doi: 10.1590/S1516-35982012001100009

56. Qiao L, Dou X, Song X, Chang J, Zeng X, Zhu L, Yi H, Xu C. Replacing dietary sodium selenite with biogenic selenium nanoparticles improves the growth performance and gut health of early-weaned piglets. *Animal Nutrition*. 2023;15:99-113. doi: 10.1016/j.aninu.2023.08.003

57. Rehman R, Sial N, Ismail A, Hussain S, Abid S, Javed M, Nadeem K, Ayoub M. Growth response in *Oryctolagus cuniculus* to selenium toxicity exposure ameliorated with vitamin E. *BioMed Research International*. 2022;2022:8216685. doi: 10.1155/2022/8216685

58. Rezaei-Ahvanooei MR, Lamanna M, Colleluori R, Formigoni A, Norouzian MA, Assadi-Alamouti A, Cavallini D. Effects of microminerals on performance and metabolic adaptation in heat-stressed dairy cows: a review. *Biological Trace Element Research*. 2025;204:3504-3521. doi: 10.1007/s12011-025-04911-8

59. Salles MSV, Zanetti MA, Junior LCR, Salles FA, Azzolini AECS, Soares EM, Faccioli LH, Valim YML. Performance and immune response of suckling calves fed organic selenium. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;188:28-35. doi: 10.1016/j.anifeeds.2013.11.008

60. Schöne F, Steinhöfel O, Weigel K, Bergmann H, Herzog E, Dunkel S, Kirmse R, Leiterer M. Selenium in feedstuffs and rations for dairy cows including a view of the food chain up to the consumer. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*. 2013;8:271-280. doi: 10.1007/s00003-013-0827-y

61. Selmani A, Matijaković Mlinarić N, Falsone SF, Vidaković I, Leitinger G, Delač I, Radatović B, Nemet I, Rončević S, Bernkop-Schnürch A, Vuletić T, Kornmueller K, Roblegg E, Prassl R. Simulated gastrointestinal fluids impact the stability of polymer-functionalized selenium nanoparticles: physicochemical aspects. *International Journal of Nanomedicine*. 2024;19:13485-13505. doi: 10.2147/IJN.S483253

62. Sgoifo Rossi CA, Compiani R, Baldi G, Muraro M, Marden JP, Rossi R, Pastorelli G, Corino C, Dell'Orto V. Organic selenium supplementation improves growth parameters, immune and antioxidant status of newly received beef cattle. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 2017;26(2):100-108. doi: 10.22358/jafs/70765/2017

63. Shabani R, Fakhraei J, Yarahmadi HM, Seidavi A. Effect of different sources of selenium on performance and characteristics of immune system of broiler chickens. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2019;48:e20180256. doi: 10.1590/rbz4820180256

64. Sheweita SA, El-Dafrawi YA, El-Ghalid OA, Ghoneim AA, Wahid A. Antioxidants (selenium and garlic) alleviated the adverse effects of tramadol on the reproductive system and oxidative stress markers in male rabbits. *Scientific Reports*. 2022;12(1):13958. doi: 10.1038/s41598-022-16862-4

65. Singh VP, Sahu DS, Singh MK, Manoj J. Effect of supplementation of selenium and Ashwagandha (*Withania somnifera*) on some haematological and immunological param-

ters of broiler chickens. Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences. 2016;3(6):406-410. doi: 10.21276/sjavs.2016.3.6.2

66. Soliman ES, Mahmoud FF, Fadel MA, Hamad RT. 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. Veterinary World. 2020;13(9):1780-1797. doi: 10.14202/vetworld.2020.1780-1797

67. Sun LL, Gao ST, Wang K, Xu JC, Sanz-Fernandez MV, Baumgard LH, Bu DP. Effects of source on bioavailability of selenium, antioxidant status, and performance in lactating dairy cows during oxidative stress-inducing conditions. Journal of Dairy Science. 2019;102(1):311-319. doi: 10.3168/jds.2018-14974

68. Sun Z, Wu K, Feng C, Lei XG. Selenium-dependent glutathione peroxidase 1 regulates transcription of elongase 3 in murine tissues. Free Radical Biology and Medicine. 2023;208:708-717. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2023.09.010

69. Tong C, Peng L, Li-Hui Y, Lin L, Kang L, Yueli C. Selenium-rich yeast attenuates ochratoxin A-induced small intestinal injury in broiler chickens by activating the Nrf2 pathway and inhibiting NF- κ B activation. Journal of Functional Foods. 2020;66:103784. doi: 10.1016/j.jff.2020.103784

70. Wang L, Song L, Wang P, Zhang H, Li Y, Song J, Zhong L, Liu C, Zhang W, Wen P. Bioreduction of Se(IV) by *Lactiplantibacillus plantarum* NML21 and synthesis of selenium nanospheres Se(0). Food Chemistry. 2024;452: 139595. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.139595

71. Wang X, Zhong Y, Zhu Z, Zhang N, Chen X, Wang F, Wang L, Chen C, He J, Li S. Gut microbiota: a new perspective for bioavailability of selenium and human health. npj Science of Food. 2025;9(1): 228. doi: 10.1038/s41538-025-00589-3

72. Wolfram S, Anliker E, Scharrer E. Uptake of selenate and selenite by isolated intestinal brush border membrane vesicles from pig, sheep, and rat. Biological Trace Element Research. 1986;10(4):293-306. doi: 10.1007/BF02802397

73. Wolfram S, Grenacher B, Scharrer E. Transport of selenate and sulphate across the intestinal brush-border membrane of pig jejunum by two common mechanisms. Quarterly Journal of Experimental Physiology. 1988;73(1):103-111. doi: 10.1113/expphysiol.1988.sp003107

74. Xu X, Wei Y, Zhang Y, Jing X, Cong X, Gao Q, Cheng S, Zhu Z, Zhu H, Zhao J, Liu Y. A new selenium source from Se-enriched *Cardamine violifolia* improves growth performance, anti-oxidative capacity and meat quality in broilers. Frontiers in Nutrition. 2022;9:996932. doi: 10.3389/fnut.2022.996932

75. Yang X, Yang C, Tang D, Yu Q, Zhang L. Effects of dietary supplementation with selenium yeast and jujube powder on mitochondrial oxidative damage and apoptosis of chicken. Poultry Science. 2022;101(10):102072. doi: 10.1016/j.psj.2022.102072

76. Ying Z, Xie S, Xiu Z, Sun Y, Yang Q, Gao H, Fan W, Wu Y. Under heat stress conditions, selenium nanoparticles promote lactation through modulation of rumen microbiota and metabolic processes in dairy goats. Scientific Reports. 2025;15:9063. doi: 10.1038/s41598-025-93710-1

77. Żarczyńska K, Sobiech P, Radwińska J, Rękawek W. Effects of selenium on animal health. Journal of Elementology. 2013;18(2):329-340. doi: 10.5601/jelem.2013.18.2.12

78. Zavyalov OA, Medetov ES, Kurilkin YaY. Selenium and zinc supplements combined with methionine: effects on blood element profiles meat production and quality in Aberdeen-Angus bulls with selenium and zinc imbalance. Journal of Siberian Federal University. Biology. 2025;18(2):216-235.

79. Zhang DG, Xu XJ, Pantopoulos K, Zhao T, Zheng H, Luo Z. HSF1-SELENOS pathway mediated dietary inorganic Se-induced lipogenesis via the up-regulation of PPAR γ expression in yellow catfish. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Gene Regulatory Mechanisms. 2022;1865(3):194802. doi: 10.1016/j.bbagr.2022.194802

80. Zhang J, Yang X, Ji T, Wen C, Ye Z, Liu X, Liang L, Liu G, Xu X. Digestion and absorption properties of *Lycium barbarum* polysaccharides stabilized selenium nanoparticles. Food Chemistry. 2022;373(Pt B):131637. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131637

81. Zhao Z, Barcus M, Kim J, Lum KL, Mills C, Lei XG. High dietary selenium intake alters lipid metabolism and protein synthesis in liver and muscle of pigs. *The Journal of Nutrition*. 2016;146(9):1625-1633. doi: 10.3945/jn.116.229955

Информация об авторах:

Олег Александрович Завьялов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 8(3532) 30-81-70.

Алексей Николаевич Фролов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 8(3532) 30-81-70.

Information about the authors:

Oleg A Zavyalov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Department of Technology of Beef Cattle Breeding and Beef Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., 460000, Orenburg, Russia, tel.: 8(3532)30-81-70.

Alexey N Frolov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Department of Technology of Beef Cattle Breeding and Beef Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., 460000, Orenburg, Russia, tel.: 8(3532)30-81-70.

Статья поступила в редакцию 26.02.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 26.02.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 15.06.2026.