
КОМПЛЕКСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОФІЛАКТИКИ ОКСИДАЦІЙНОГО СТРЕСУ ТА ІМУНОДЕФІЦИТНИХ СТАНІВ У ТВАРИН ЗА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Вус У. М., Гутий Б. В.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-13>

ВСТУП

У сучасній ветеринарній науці та практиці особливу увагу приділяють пошуку ефективних засобів, здатних підвищувати неспецифічну резистентність та адаптаційний потенціал тварин в умовах дії стресових і токсичних факторів середовища. Тривала експозиція важких металів, мікотоксинів, пестицидів або інших ксенобіотиків спричиняє глибокі порушення у функціонуванні антиоксидантної та імунної систем, що проявляється розвитком оксидативного стресу, імунодефіцитних станів і метаболічних дисфункцій¹. У даному контексті перспективним напрямом вважається комплексне застосування антиоксидантів, вітамінів і метаболічних коректорів, які здатні не лише нейтралізувати вільнорадикальні процеси, але й відновлювати структурно-функціональну цілісність клітинних мембран, активність ензимних систем і гормональну рівновагу.

До найбільш ефективних засобів належать вітаміни антиоксидантної дії (Е, С, А, групи В), а також вітаміноподібна речовина L-карнітин і есенціальна амінокислота метіонін, які беруть участь у регуляції енергетичного метаболізму, біосинтезі білка та активації імунокомпетентних клітин. Важливе значення мають також мікроелементи селен і цинк, що входять до складу ключових антиоксидантних ферментів – глутатіонпероксидази та супероксиддисмутази. Вони забезпечують захист клітин від пероксидного окиснення ліпідів, підтримують стабільність імунної відповіді, а також потенціюють дію вітамінів і амінокислот, створюючи синергічний ефект у системі антиоксидантного гомеостазу. Їх поєднане використання у схемах

¹ Мартишук Т. В., Гутий Б. В. Імунофізіологічний стан та антиоксидантний потенціал організму поросят за умов оксидативного стресу та дії коригуючих чинників : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2021. 108 с.

профілактики та лікування дозволяє зміцнити природні захисні системи організму, підвищити стійкість до дії токсикантів, стимулювати імунну відповідь і підтримати продуктивність тварин на високому рівні.

1. Використання L-карнітину як метаболічного коректора у тваринництві

Серед сучасних засобів підвищення адаптаційної здатності та стійкості організму тварин значне місце посідають метаболічні коректори вітаміноподібної природи, зокрема L-карнітин². Його біологічна дія пов'язана з ключовою роллю у транспорті довголанцюгових жирних кислот через внутрішню мембрану мітохондрій, що забезпечує оптимізацію енергетичного обміну, зменшення ліпідного навантаження на печінку та підвищення ефективності окисних процесів. Він сприяє збереженню клітинної енергетики в умовах стресу, стабілізує структуру мітохондрій, нормалізує співвідношення НАД⁺/НАДН, а також зменшує інтенсивність вільнорадикальних процесів, виконуючи антиоксидантну функцію. Застосування L-карнітин тваринам сприяє підвищенню опірності організму до гіпоксії та інтоксикацій, що особливо важливо при утриманні тварин у техногенно навантажених регіонах або при дії токсичних елементів³.

У дослідженнях Єфімова В. Г. та ін. (2011) доведено, що введення L-карнітину у складі кормової добавки «Карнікінг» (50 % L-карнітину) у дозі 500 г/т комбікорму позитивно впливає на морфологічні показники крові поросят у період відлучення. Встановлено, що у тварин дослідної групи рівень гемоглобіну зростає на 42,6 % ($p < 0,05$), а гематокриту – на 21,5 % ($p < 0,001$) порівняно з контролем. Одночасно спостерігалось збільшення кількості еритроцитів і лімфоцитів, що вказує про активацію еритропоезу та клітинного імунітету. Позитивна дія L-карнітину пояснюється його участю в підтриманні енергетичного гомеостазу, мембранопротекторних та детоксикаційних процесах. Він попереджає розвиток гіпохромної анемії, знижує рівень стрес-індукованого катаболізму, нормалізує лейкоцитарну формулу та сприяє швидкій адаптації тварин до технологічних навантажень⁴.

² Li J., Liu L., Weng J., Yin T. L., Yang J., Feng H. L. Biological roles of l-carnitine in oocyte and early embryo development. *Molecular reproduction and development*. 2021. Vol. 88, No. 10. P. 673–685.

³ Karam K. M., Alebady A. S., Al-Nailey K. G. C., Al-Delemi D. H. J. L-Carnitine effect on induced hyperlipidemia on premature rats: fertility profile. *Journal of medicine and life*. 2022. Vol. 15, No. 1. P. 124–131.

⁴ Єфімов В. Г., Костюшкович К. Л., Дідик К. О., Алексєєва Н. В. Вплив L-карнітину на морфологічні показники крові поросят у період відлучення. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2011. № 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2011_2_28

Криницька І. Я. та співавт. (2010) на основі проведених досліджень встановила, що введення карнітину хлориду тваринам із гострим алкогольним отруєнням на тлі інтоксикації кадмію хлоридом та ацетатом свинцю сприяє зниженню інтенсивності лізису білкових структур – як низько-, так і високомолекулярних білків та колагену – й одночасно підвищує інгібіторний потенціал плазми крові. Зростання рівня інгібіторів у крові під впливом карнітину хлориду може бути пов'язане з його здатністю активізувати метаболічні процеси, зокрема анаболічну ланку гомеостазу, що забезпечує синтез білкових структур. Крім того, враховуючи, що окиснені білки є більш чутливими до протеолітичного розщеплення, а етанол і солі важких металів проявляють виражену прооксидантну дію, можна зробити висновок, що карнітину хлорид має антиоксидантні властивості, завдяки яким запобігає окисненню активних центрів білкових інгібіторів та стабілізує білковий обмін у організмі⁵.

L-карнітин справляє виражений позитивний вплив на показники ендогенної інтоксикації за умов токсичного ураження парацетамолом у поєднанні з харчовою депривацією. Це проявляється зниженням рівня ланцюгових і ароматичних амінокислот у складі пептидних фракцій молекул середньої маси, а також послабленням їх загального токсичного впливу на мембрани еритроцитів. Найбільш виражений коригувальний ефект препарату спостерігається на сьому добу експерименту, що вказує про його здатність стабілізувати обмінні процеси та зменшувати прояви ендотоксикозу⁶.

Карнітин проявляє виражену антиоксидантну активність, оскільки стимулює каталазу – один із ключових ензимів системи антиоксидантного захисту організму. Дану властивість необхідно враховувати при визначенні оптимальних доз препаратів на основі карнітину, особливо під час їх застосування у практиці ветеринарної медицини. Також варто зазначити, що карнітин виконує функції антигіпоксанта та імуномодулятора, пригнічує агрегацію тромбоцитів і виявляє фібринолітичну активність, що сприяє покращенню мікроциркуляції, підвищенню швидкості кровотоку та, відповідно, ефективнішому транспорту кисню до м'язів. Додатково встановлено, що L-карнітин може діяти як антагоніст

⁵ Криницька І. Я., Марущак М. І., Лазарчук О. В., Мудра А. Є., Яворська С. І., Габор Г. Г. Вплив карнітину хлориду на показники протеїназо-інгібіторної системи у щурів за умови гострого алкогольного отруєння на тлі інтоксикації солями кадмію та свинцю. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2010. № 1. С. 79–82.

⁶ Гембаровський М. В. (2013). Вплив L-карнітину на показники ендогенної інтоксикації за умови експериментального токсичного ураження парацетамолом на тлі харчової депривації. *Медична хімія*. 2013. Т. 15, № 2. С. 68–71.

простагландину H₂, беручи участь у регуляції судинного тонусу та забезпечуючи вплив на киснево-транспортну функцію крові⁷.

Цехмістренко С. І. та Коберська В. А. (2012) довели, що додавання L-карнітину до розріджувача сперми бугаїв сприяє активації ензимів антиоксидантного захисту – каталази та глутатіонпероксидази – і підвищує виживання спермій. Оптимальна концентрація препарату (30 мг/100 мл) забезпечує нормалізацію клітинного метаболізму за умов оксидативного стресу, стабілізує мембрани, підвищує енергетичний потенціал клітин і проявляє виражену антиоксидантну дію. Це підтверджує ефективність використання L-карнітину як метаболічного і антиоксидантного засобу для підвищення відтворювальної здатності тварин⁸.

Коберська В. А. (2015) встановила, що згодовування L-карнітину у складі раціону бугаїв у дозах 20–40 г/добу сприяє підвищенню вмісту фосфоліпідів у спермі, зниженню рівня холестеролу та неестерифікованих жирних кислот, стабілізації мембран і зменшенню інтенсивності пероксидного окиснення ліпідів. Це супроводжується підвищенням активності, концентрації та виживання спермій. Механізм дії L-карнітину пов'язаний із активацією анаболічних процесів, мобілізацією ліпідів як енергетичного субстрату та оптимізацією фосфоліпідного складу мембран, що забезпечує підвищення фертильності та резистентності тварин⁹.

За даними Загайко А. Л. та співавт. (2016), L-карнітин є ключовою вітаміноподібною речовиною, що регулює енергетичний обмін, β-окиснення жирних кислот і детоксикацію ксенобіотиків. Він виконує анаболічну, антиоксидантну, антиапоптотичну та нейропротекторну функції, стабілізуючи клітинні мембрани і підвищуючи активність ферментів антиоксидантного захисту. Доведено ефективність застосування L-карнітину при патологіях печінки, серця, нервової системи та ендокринних розладах, що вказує про його значний потенціал у ветеринарній практиці як метаболічного коректора й імуномодулюючого засобу¹⁰.

⁷ Gu S., Wang W., Ye G., Chen C., Zhou Y., Guo L., Zhong S., Li X., Fu X., Wen C., Tang L., Sun J., Hou J., Li Y. Hepatocyte-Derived L-Carnitine Restricts Hepatitis B Surface Antigen Loss Through an Immunosuppressive Effect on Germinal Center-Related Immune Cells. *The Journal of Infectious Diseases*. 2022. Vol. 225, No. 11. P. 1955–1966.

⁸ Цехмістренко С. І., Коберська В. А. Активність ферментів антиоксидантного захисту в еякулятах бугаїв за додавання L-карнітину до розріджувача сперми. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2012. № 8. С. 116–119.

⁹ Коберська В. А. Вплив L-карнітину у складі раціону бугаїв на ліпідний склад та якість сперми. *Біологія тварин*. 2015. Т. 17, № 1. С. 62–67.

¹⁰ Загайко А. Л., Брюханова Т. О., Шинкарьов А. А., Мельник Н. В. Метаболічні ефекти карнітину, роль у розвитку патологій та перспективи клінічного застосування (огляд). *Український біофармацевтичний журнал*. 2016. № 6. С. 17–22.

Присяжнюк В. П. (2017) довів високу ефективність включення L-карнітину до комплексного лікування хворих із неалкогольною жировою хворобою печінки. Введення препарату забезпечувало зниження активності трансаміназ, γ -глутамілтранспептидази, лактатдегідрогенази, нормалізацію вуглеводного обміну та зменшення інтенсивності запалення. Виявлено суттєве зниження рівнів TNF- α і лептину при одночасному підвищенні адипонектину, що вказує про відновлення цитокинового та адипокінового балансу. Таким чином, L-карнітин проявляє виражену гепатопротекторну, антиоксидантну та антизапальну дію, а також може розглядатись як перспективний метаболічний коректор у ветеринарній практиці для підвищення резистентності організму тварин до токсичних уражень печінки¹¹.

Карнітин є біологічно активною добавкою, яка знижує рівень холестеролу та тригліцеридів, сприяє нормалізації ліпідного обміну в печінці та попереджає розвиток атеросклеротичних змін. Його застосування оптимізує метаболічні процеси, покращує функціональний стан печінки, що має особливе значення для організмів із підвищеним токсичним навантаженням або наслідками зловживання алкоголем. Карнітин також сприяє виведенню з цитоплазми клітин проміжних метаболітів і токсичних сполук, запобігаючи їх накопиченню в організмі. До основних фармакологічних ефектів карнітину хлориду належать стимуляція імунної системи та активація процесів детоксикації, що забезпечує очищення організму від шкідливих речовин і підтримує метаболічну рівновагу¹².

П'ятничко О. М. та співавт. (2021) довели, що комбінований препарат на основі бутафосфану, вітамінів групи B і L-карнітину проявляє виражену метаболічну, гепато- та нефропротекторну дію у коней, які зазнають надмірного навантаження або інтоксикації. Препарат стимулює еритропоез, білковий і енергетичний обмін, нормалізує активність ензимів (АсАТ, АлАТ, ЛДГ), знижує прояви інтоксикації та сприяє відновленню гомеостазу. Таким чином, поєднання бутафосфану, вітамінів B₁₂, B₃ і L-карнітину забезпечує антистресовий, тонізуючий і антиоксидантний ефекти, що дозволяє використовувати

¹¹ Присяжнюк В. П. Ефективність застосування L-карнітину у комплексному лікуванні хворих на неалкогольну жирову хворобу печінки. *Гепатологія*. 2017. № 1. С. 40–48.

¹² Демків І. Я. Вплив карнітину хлориду на показники імунітету та стан антиоксидантної системи у тварин із гострим отруєнням етиловим спиртом на фоні тривалої інтоксикації солями свинцю і кадмію. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Медицина*. 2008. Вип. 33. С. 44–49.

подібні комплекси для підвищення резистентності та функціональної стабільності організму тварин¹³.

Лучин І. С. та ін. (2024) встановили, що додавання препарату L-карнітину “CarnEon 50” у дозах 200–250 г/т комбікорму в годівлі молодняку кролів сприяє підвищенню середньодобових приростів на 4,2–10,5%, поліпшенню засвоєння корму на 2,5–3,9% і збільшенню маси парної тушки на 124 г. Препарат забезпечував антиоксидантну, антистресову та метаболічну дію, запобігав розвитку гастроентероколітів і втрат поголів'я. Оптимальною дозою визначено 200–250 г/т комбікорму, що підвищує рентабельність виробництва кролятини до 34%. Таким чином, L-карнітин можна розглядати як безпечний природний біостимулятор, який покращує енергетичний обмін, адаптаційні можливості та продуктивність тварин¹⁴.

Таким чином, L-карнітин є ефективним засобом підвищення природної резистентності тварин, який проявляє антистресову, антиоксидантну, імуномодуючу та гемопоетичну дію. Його включення до складу кормових добавок або комплексних препаратів разом із вітамінами, селеном і цинком сприяє зміцненню захисних систем організму та забезпечує вищий рівень продуктивності і збереженості молодняку.

2. Роль вітамінів E і B₁₂ у підтриманні метаболічної рівноваги та імунного статусу тварин

Вітаміни є незамінними біорегуляторами, які відіграють важливу роль у підтриманні гомеостазу, метаболічної стабільності та адаптаційних можливостей організму тварин. Вони приймають участь у регуляції окисно-відновних реакцій, синтезі ензимів, гормонів, нуклеїнових кислот, а також у функціонуванні системи антиоксидантного захисту. Дефіцит або дисбаланс вітамінів призводить до порушень білкового, ліпідного та вуглеводного обміну, зниження неспецифічної резистентності, розвитку

¹³ П'ятничко О. М., Жила М. І., Шкодяк Н. В., Салій О. О., Деркач М. В., Калиновська Л. В. Ефективність застосування препарату на основі бутафосфану, вітамінів групи В та L-карнітину при лікуванні коней. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2021. Т. 23, № 101. С. 31–37.

¹⁴ Лучин І. С., Сотніченко Ю. М., Невесенко А. В., Білан А. П. Безпечність і продуктивна дія препарату L-карнітину на інтенсивність росту молодняку кролів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 100–112.

гіповітамінозів, імунодепресивних станів та патологій печінки, травного каналу, серцево-судинної та нервової систем¹⁵.

Особливе значення вітамінів у ветеринарній практиці зумовлене їх комплексною фізіолого-біохімічною дією. Вітамін А забезпечує нормальний ріст і регенерацію епітелію, приймає участь у синтезі глікопротеїнів; вітамін Е виступає потужним антиоксидантом, що запобігає пероксидному окисненню ліпідів і стабілізує клітинні мембрани; вітамін С підвищує антиоксидантний потенціал і фагоцитарну активність лейкоцитів; вітаміни групи В – каталізують ферментативні реакції вуглеводного, жирового та білкового обміну, сприяють функціонуванню нервової системи¹⁶.

Вітамін В₁₂ (ціанокобаламін) є одним із найважливіших водорозчинних вітамінів, який приймає участь у регуляції клітинного метаболізму, синтезі нуклеїнових кислот, еритропоезі та функціонуванні нервової системи. Його молекула містить центральний атом кобальту, завдяки чому вітамін відноситься до кобаламінів – коферментів, що забезпечують реалізацію реакцій переносу метильних груп і перетворення жирних кислот¹⁷.

У ветеринарній практиці вітамін В₁₂ застосовується для профілактики анемії, стимуляції росту, покращення апетиту, поліпшення функції печінки, нервової та серцево-судинної систем, а також у комплексній терапії токсичних уражень, гіповітамінозів та інтоксикацій¹⁸. Препарати на основі ціанокобаламіну та метилкобаламіну, зокрема В₁₂ Анкерман, продемонстрували високу ефективність і безпечність при усуненні дефіцитних станів, відновленні метаболічного балансу та профілактиці нейродегенеративних процесів.

Вітамін В₁₂ тісно взаємодіє з фолієвою кислотою та метіоніном, утворюючи єдину метаболічну систему, яка регулює реметилування

¹⁵ Lavryshyn Y., Gutyj B., Zhyla M., Kurylas L., Prysiazniuk V., Khariv I., Voroniak V. Influence of “Metisevit” feed additive and liposomal preparation “Lipointersil” on the level of vitamins in the blood of bulls at experimental chronic cadmium toxicosis. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2020. Vol. 22, No. 100. P. 88–93.

¹⁶ Гутій Б. В. Вміст вітамінів А і Е у крові бичків за умов кадмієвої інтоксикації. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2013. № 2. С. 31–33.

¹⁷ Al Amin A. S. M., Gupta V. Vitamin B12 (Cobalamin) // *StatPearls*. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2023

¹⁸ Golovach P., Gutyj B., Kolomiets I., Ostapiv D., Oseredchuk R., Sloboda O. The effect of B groups vitamins (B1, B2, B5, B6, B10, B12) on the activity of antioxidant protection system enzymes and the content of lipid peroxide oxidation products in the blood of feeding cattle. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2023. Vol. 25, No. 112. P. 22–26.

гомоцистеїну, синтез нуклеїнових кислот і метилювання біомолекул. Його дефіцит призводить до накопичення гомоцистеїну – сполуки з вираженою токсичною дією, що викликає оксидативний стрес, ендотеліальну дисфункцію, судинні порушення і прискорене старіння клітин. Це має безпосереднє значення для ветеринарної практики, оскільки подібні метаболічні розлади у тварин знижують продуктивність, фертильність і резистентність до захворювань¹⁹.

Вітамін В₁₂ має важливе антиоксидантне та нейропротекторне значення, оскільки приймає участь у відновленні мієлінових оболонки нервових волокон, знижує оксидативний стрес, попереджує ушкодження мембран нейронів. В експериментальних і клінічних дослідженнях доведено, що введення вітаміну В₁₂ сприяє регенерації нервової тканини, стимулює диференціацію шванівських клітин, підвищує провідність нервових імпульсів і чинить анальгетичний ефект. Саме тому метилкобаламін активно застосовується при полінейропатіях, гіпоксичних ураженнях мозку та інтоксикаціях важкими металами²⁰.

Отже, вітамін В₁₂ є ключовим компонентом системи підтримання метаболічної, гематологічної та нервової рівноваги організму тварин. Його достатнє надходження з кормом або у складі вітамінно-мінеральних комплексів є обов'язковою умовою ефективного росту, нормалізації функції печінки, кровотворення, відтворення та адаптації тварин до стресових і токсичних чинників.

Загальновізвано, що вітамін Е характеризується високою антиоксидантною активністю і відіграє ключову роль у нейтралізації активних форм кисню, які спричиняють оксидативне ушкодження клітинних мембран і біомолекул²¹. Завдяки здатності виступати донором або переносником атомів водню, даний вітамін гальмує процеси пероксидного окиснення ліпідів. Ефективність дії вітаміну Е є надзвичайно високою – навіть за низької його концентрації у клітинних мембранах, він забезпечує надійний захист ліпідів і білків від оксидативного пошкодження та від впливу екзогенних активних форм кисню²².

¹⁹ Можина Т. Дефіцит вітаміну В12: за матеріалами мультидисциплінарного майстер-класу з проблем діагностики та лікування. *Український медичний часопис*. 2024. № 6. С. 57–60

²⁰ Сергієнко В. О., Сегін В. Б., Сергієнко О. О. Вітамін В12 і діабетичні нейропатії. *Міжнародний ендокринологічний журнал*. 2024. Т. 20, № 7. С. 481–490.

²¹ Donnelly J., Appathurai A., Yeoh H. L., Driscoll K., Faisal W. Vitamin E in Cancer Treatment: A Review of Clinical Applications in Randomized Control Trials. *Nutrients*. 2022. Vol. 14, No. 20. Art. 4329.

²² Гутій Б. В. Вплив Метісевіту на вміст вітамінів А і Е у крові бугайців за умов кадмієвого навантаження. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2016. № 11. С. 10–13.

Вітамін Е сприяє підвищенню резистентності організму до дії низьких температур, гіпоксії та інтенсивних фізичних навантажень. Йому притаманна виражена гепатопротекторна активність: він запобігає розвитку жирової дистрофії печінки за умов етанолової інтоксикації, зменшує оксидативні ушкодження гепатоцитів, послаблює негативний вплив бактеріальних токсинів, а також полегшує перебіг гострих гепатитів і цирозу, сприяючи нормалізації екскреції білірубину²³.

Вітамін Е проявляє багатогранний позитивний вплив на організм тварин, зокрема активізує функціонування імунної системи, приймає участь у регуляції обмінних процесів, покращує мікроциркуляцію та підтримує еластичність судинних стінок. Він сприяє зниженню артеріального тиску, запобігає тромбоутворенню і підвищує оксигенацію крові, а також бере участь у процесах регенерації та відновлення тканин.

Антиоксидантна захисна функція токоферолу особливо виражена під час впливу ультрафіолетового випромінювання на шкіру, оскільки кератиноцити містять значну кількість цього вітаміну. Як основний жиророзчинний антиоксидант, вітамін Е здатний ефективно запобігати мутагенній та канцерогенній дії вільних радикалів, обмежуючи їх руйнівний вплив на клітинні структури²⁴.

Таким чином, антиоксидантна дія вітаміну Е полягає у перериванні ланцюгових реакцій перекисного окиснення в клітинних мембранах та нейтралізації активних форм кисню. Зокрема, γ -токоферол здатний захищати ліпіди, ДНК і білкові молекули від ушкоджувальної дії пероксинітриду²⁵.

Щодо ролі вітаміну Е у підтриманні стабільності клітинних мембран, літературні дані залишаються досить суперечливими. З одного боку, дефіцит α -токоферолу у складі мембран спричиняє підвищення їх проникності та дестабілізацію, що пов'язано з утворенням комплексів між жирними кислотами та лізофосфоліпідами у фосфоліпідному бішарі, внаслідок чого зменшується плинність мембранних фосфоліпідів. З іншого боку, α -токоферол здатний інгібувати активність

²³ Вудмаска І. В., Сачко С. Р., Петрук А. П., Пахолків Н. І., Гудима В. Ю., Скорохід А. В. Корекція біохімічних показників крові корів у перед- і післятільний періоди шизками хмелю та вітаміном Е. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2019. Т. 21, № 95. С. 117–121.

²⁴ Shklar G., Schwartz J., Trickler D. P., Niukian K. Regression by vitamin E of experimental oral cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 1987. Vol. 78, No. 5. P. 987–992.

²⁵ Купша О. І. Морфофункціональні зміни в печінці мишей при тривалому надходженні в організм малих доз свинцю і вплив на них альфа-токоферолу та ербісолу : автореф. дис. ... канд. біол. наук. Сімферополь, 2010. 17 с.

мембранозв'язаної фосфоліпази A₂, запобігаючи літичному руйнуванню фосфоліпідів і тим самим підтримуючи структурну цілісність мембран²⁶.

Вітамін Е, забезпечуючи рівновагу між прооксидантною та антиоксидантною системами, бере активну участь у регуляції функцій клітин імунної системи, зокрема у процесах інтеграції та функціонування мембранних ліпідів, білків і нуклеїнових кислот, а також у контролі експресії генів²⁷.

Вітамін Е проявляє імуностимулювальний вплив, посилюючи передачу сигналів, що активують імунокомпетентні клітини під час формування імунної відповіді. Зокрема, вітамін підсилює сигнальні шляхи, які стимулюють синтез інтерлейкіну-2 та інтерферонів CD4⁺ лімфоцитами. Крім того, вітамін Е перешкоджає утворенню ковалентних зв'язків між низькомолекулярними сполуками та білками крові й печінки, зокрема за дії іонізуючого випромінювання. Завдяки цьому зменшується агрегація імунних комплексів і попереджається ушкодження біомолекул²⁸.

У сучасних умовах техногенного навантаження, підвищеної інтенсивності виробництва та стресових впливів на тварин комплексне застосування вітамінів разом із метаболічними коректорами (L-карнітин, метіонін, селен, цинк) забезпечує посилення антиоксидантного захисту, активацію репараційних процесів, покращення функціонального стану печінки та підтримання імунної реактивності. Такі комбінації сприяють збереженню здоров'я тварин, підвищенню продуктивності та біологічної повноцінності продукції тваринництва.

3. Біологічна роль селену, цинку та метіоніну у підтриманні антиоксидантного статусу та метаболічної рівноваги організму тварин

Серед мікроелементів і біогенних сполук, що забезпечують антиоксидантний захист організму тварин, особливе значення мають селен, цинк і метіонін²⁹. Вони беруть участь у нейтралізації вільних радикалів,

²⁶ Karpiuk I., Wilczura-Wachnik H., Myśliński A. α -Tocopherol/AOT/alkane/water system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. Vol. 131, No. 3. P. 2885–2892.

²⁷ Naksuriya O., Okonogi S. Comparison and combination effects on antioxidant power of curcumin with gallic acid, ascorbic acid, and xanthone. *Drug Discoveries & Therapeutics*. 2015. Vol. 9, No. 2. P. 136–141.

²⁸ Lewis E. D., Meydani S. N., Wu D. Regulatory role of vitamin E in the immune system and inflammation. *IUBMB Life*. 2018. Vol. 71, No. 4. P. 487–494.

²⁹ Bashchenko M. I., Boiko O. V., Lesyk Y. V., Honchar O. F., Havrysh O. M., Gutyj B. V., Hoivanovych N. K., Krechkivska H. V. Changes in the blood parameters of rabbits consuming a complex of citrates of zinc, selenium, and germanium under the conditions of heat stress. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 702–708.

підтриманні структурної цілісності клітинних мембран, а також у регуляції білкового, ліпідного й енергетичного обміну. У сучасній ветеринарній практиці дані речовини розглядаються як ключові метаболічні коректори, що сприяють адаптації тварин до впливу токсичних і стресових чинників.

За даними наукових джерел, селен є одним із найефективніших антиоксидантів прямої дії та потужним імуномодулятором, який захищає клітини від ушкоджувальної дії вільних радикалів і активних форм кисню, регулюючи інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів. У комплексі вітамін Е та селен проявляють синергічну дію, демонструючи виражені антиоксидантні властивості, що полягають у перериванні ланцюгових реакцій перекисного окиснення ліпідів³⁰.

Надходження селену в фізіологічно обґрунтованих кількостях сприяє оптимальній експресії біоактивних селенопротеїнів, більшість із яких містять селеноцистеїн (Sec) у своєму складі та характеризуються ферментативною активністю, зумовленою наявністю атома селену в каталітичному центрі. Селенопротеїни (SePP) виконують ключову роль у регуляції численних клітинних процесів: ензими глутатіонпероксидазного комплексу (GPx) забезпечують антиоксидантний захист клітин, каталізуючи відновлення органічних гідропероксидів і перекису водню; йодтиронін-дейодинази контролюють активність гормонів щитоподібної залози, впливають на проліферацію клітин та модулюють імунну відповідь³¹.

У дослідженнях Ковальчук І. І., Проданчук О. В. та співавт. (2024) доведено, що селен у формі цитрату чинить виражений позитивний вплив на гематологічні показники, фізіолого-біохімічний стан і продуктивність кролів. Введення нанотехнологічного цитрату селену у питну воду тварин у концентраціях 50–200 мкг/л сприяло підвищенню кількості еритроцитів, рівня гемоглобіну та лейкоцитів, а також покращенню інтенсивності росту та середньодобових приростів маси тіла. Дослідники підкреслюють, що селен активує процеси гемопоезу, стимулює синтез протеїнів і ензимів антиоксидантної системи, сприяє підвищенню резистентності організму, а також бере участь у підтриманні метаболічної рівноваги. За тривалішого використання цитрату селену спостерігали зростання вмісту гемоглобіну на 8,6–10,2 % та підвищення

³⁰ Ковальова І. В., Антоненко П. П. Динаміка змін продуктивних якостей курей за впливу селену та фітодобавок. *Проблеми зооінженерії та ветеринарної медицини* : зб. наук. праць Харківської державної зооветеринарної академії. Харків, 2018. Т. 35, № 3. С. 145–150.

³¹ Schomburg L. The other view: the trace element selenium as a micronutrient in thyroid disease, diabetes, and beyond. *Hormones (Athens)*. 2020. Vol. 19, No. 1. P. 15–24.

кількості лейкоцитів на 30–34% порівняно з контролем. Це вказує про активацію лейкопоетичної функції кісткового мозку та посилення імунної відповіді³².

Селен функціонує у тісній взаємодії з вітамінами А, Е та С, а також із каротиноїдами й глутатіоном. Ці речовини утворюють єдину систему антиоксидантного захисту клітини, де кожен компонент виконує синергічну функцію: токоферол і аскорбінова кислота відновлюють окиснені форми глутатіону, а селен у складі глутатіонпероксидази знешкоджує гідропероксиди³³.

Відомо, що селен виконує подвійну функцію в регуляції відтворювальної здатності організму бугаїв. У складі плазми сперми він наявний як компонент селензалежної глутатіонпероксидази (ГП), яка забезпечує антиоксидантний захист сперматозоїдів, тоді як у самих сперматозоїдах селен входить до складу структурних елементів клітини, підтримуючи їхню цілісність і функціональну активність³⁴.

Установлено, що селенометіонін засвоюється значно краще, ніж неорганічні форми селену (селеніт натрію), що робить органічні сполуки більш ефективними та менш токсичними. Саме тому в сучасній ветеринарії перевагу віддають селеноорганічним препаратам, таким як Сел-Плекс, які забезпечують оптимальне надходження мікроелемента без ризику отруєння³⁵.

Селен виступає ключовим мікроелементом імунної регуляції, впливаючи як на клітинну, так і на гуморальну ланки імунітету тварин. Дефіцит даного елемента супроводжується зниженням активності фагоцитів, проліферації лімфоцитів, синтезу імуноглобулінів та

³² Ковальчук І. І., Проданчук О. В., Лесик Я. В., Цам М. М., Пилипець А. З., Колотницький В. А. Фізіолого-біохімічні показники крові і продуктивність кролів за випоювання нанотехнологічного селену цитрату. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 144–156.

³³ Ніщенко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193

³⁴ Слободян С. О., Гутий Б. В., Мурська С. Д. Вплив селеніту натрію і кормової добавки «Метісвіт плюс» на морфологічні показники крові шурів за інтоксикації кадмієм і свинцем. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гіжиського*. Серія: *Ветеринарні науки*. 2020. Т. 22, № 97. С. 52–57

³⁵ Федорченко А. М., Івченко В. М. Показники імунобіологічної реактивності та антиоксидантної системи глибокотільних корів під впливом селеноорганічного препарату Сел-Плекс. *Науковий вісник ветеринарної медицини : зб. наук. праць*. Біла Церква, 2012. Вип. 10 (99). С. 112–116.

інтерферонів, що підвищує сприйнятливість молодняка до інфекційних захворювань³⁶.

Крім того, селен здатний підвищувати ефективність вакцинації, зменшуючи поствакцинальний стрес і посилюючи формування специфічного імунітету. Цей ефект обумовлений стимуляцією лейкопоезу, синтезу цитокінів і підвищенням експресії рецепторів на лімфоцитах, що покращує міжклітинну взаємодію в імунній відповіді³⁷.

Імуномодулювальна дія селену проявляється як на гуморальному, так і на клітинному рівнях функціонування імунної системи. Доведено, що дефіцит даного мікроелемента супроводжується зменшенням синтезу антитіл, порушенням диференціювання тимоцитів, зниженням активності фагоцитів і проліферації лімфоцитів, що в цілому веде до ослаблення вродженого та адаптивного імунітету³⁸.

Дефіцит селену призводить до зниження синтезу імуноглобулінів класів IgG та IgM, водночас не впливаючи істотно на рівень IgA. Додавання цього мікроелемента до раціону частково компенсує дефіцит вітаміну E, нормалізуючи вміст IgA та IgG. Встановлено, що у корів, яким згодовували корми з додатковим вмістом 120 мкг селену на кілограм, рівень IgG у сироватці крові був вищим, ніж у контрольних тварин. Аналогічна тенденція спостерігалася і в телят, народжених від цих корів, – після споживання молозива вміст IgG у їхній крові перевищував показники контрольної групи. Таким чином, збагачення раціону селеном сприяє підвищенню життєздатності як матерів, так і потомства. Важливу роль селену в реалізації імунної відповіді підтверджує підвищенням активності селенофосфатсинтетики в Т-лімфоцитах під час їх активації – ферменту, що каталізує утворення селеноцистеїну, необхідного для синтезу селенопротеїнів³⁹.

Водночас біологічна доступність сполук Селену та інтенсивність включення елемента до складу протеїнів значно підвищується за високого вмісту в раціоні іонів Цинку. Цинк стимулює ріст та розвиток організму

³⁶ Нішеменко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193.

³⁷ Івченко В. М., Федорченко А. М. Вплив селеновмісного препарату Сел-Плекс на імунобіологічні показники телят, імунізованих проти сальмонельозу. *Науковий вісник ветеринарної медицини* : зб. наук. праць. Біла Церква, 2011. Вип. 8, № 87. С. 45–50.

³⁸ Dhur A., Galan P., Hercberg S. Relationship between selenium, immunity and resistance against infection. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Comparative Pharmacology and Toxicology*. 1990. Vol. 96, No. 2. P. 271–280.

³⁹ Гаранович І. І. Імунний статус великої рогатої худоби в критичні періоди. *Фізіологічний журнал*. 1997. № 3–4. С. 19–24.

тварин завдяки активації механізмів синтезу протеїну, що сприяє збільшенню м'язової маси та загальному росту. Також є кофактором більше 300 ензимів, що приймають участь у біохімічних реакціях, процесах метаболізму протеїнів, вуглеводів, нуклеїнових кислот та антиоксидантного захисту. Він активує ензими, що приймають участь у метаболізмі глюкози, зокрема глюкозо-6-фосфатдегідрогеназу⁴⁰. Даний ензим є ключовим у процесі гліколізу, оскільки перетворює глюкозу в енергію у вигляді молекул АТФ. Цинк забезпечує стабільний рівень енергії в організмі, що є важливим для нормального функціонування органів і систем під час стресових умов⁴¹.

Надлишкове надходження цинку може мати антагоністичний вплив на метаболізм міді, заліза й кальцію, тому важливо дотримуватись оптимального співвідношення мікроелементів у раціоні тварин⁴².

Цинк належить до найважливіших мікроелементів організму, виконуючи ключову роль у функціонуванні понад 300 ферментів і беручи участь у всіх основних біохімічних процесах, які залежать від їхньої активності. Він є каталізатором, структурним компонентом і регуляторним іоном, що забезпечує нормальний перебіг імунних реакцій⁴³.

Цинк необхідний для росту, диференціації та функціонування клітин імунної системи, зокрема нейтрофілів, природних кілерів і Т-лімфоцитів, які відіграють вирішальну роль у вродженому та адаптивному імунітеті. Він бере участь у синтезі ДНК, клітинному поділі та активації імунних клітин, забезпечуючи ефективну імунну відповідь. Дефіцит цинку спричиняє пригнічення імунної функції, зниження продукції цитокінів, активності лімфоцитів і підвищує сприйнятливість організму до інфекційних агентів. Крім того, цинк проявляє антиоксидантні та протизапальні властивості, які допомагають захищати клітини від оксидативного ушкодження та регулювати інтенсивність імунних реакцій⁴⁴.

⁴⁰ Dzen Y., Rosalovsky V., Shtapenko O., Slypaniuk O., Salyha Y. Effect of zinc methionine supplementation on biochemical and hematological indices of growing rabbits. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2023. Vol. 29, No. 4. P. 714–722.

⁴¹ Юзв'як М. О., Лесик Я. В. Клінічні параметри організму кролів за умов теплового стресу та впливу наночастинок цинку, селену і германію цитратів. *Ефективне кролівництво і звіриництво*. 2024. № 10. С. 169–184.

⁴² Григорова Н. В. Динаміка вмісту цинку, магнію та міді в клітинах тимуса тварин за умов введення сульфатів цих металів. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 12. С. 53–60.

⁴³ Naase H., Ellinger S., Linseisen J., Neuhäuser-Berthold M., Richter M., German Nutrition Society (DGE). Revised D-A-CH-reference values for the intake of zinc. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 61. Art. 126536.

⁴⁴ Нефьодова О. О., Янушкевич К. С. Інтоксикаційний вплив солей свинцю та кадмію на печінку шурів із корекцією сукцинатами цинку та заліза. *Перспективи та інновації науки* (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»). 2024. № 2. С. 1170–1183.

Цинк входить до активних центрів металоензимів і бере участь у формуванні фермент-цинк-субстратних комплексів, без яких взаємодія ензиму з субстратом є неможливою. Крім того, іони цинку є структурним компонентом численних неферментативних металопротеїнів, де вони стабілізують вторинну та третинну структуру білкових молекул, забезпечуючи їх функціональну активність і конформаційну стійкість⁴⁵.

Цинк впливає на багато аспектів функціонування імунної системи, відіграючи ключову роль у розвитку та диференціації клітин. Його дефіцит призводить до порушення роботи макрофагів, зокрема процесу фагоцитозу, а також негативно відбивається на дозріванні та активності Т- і В-лімфоцитів. Такі зміни є наслідком дисрегуляції основних біологічних процесів на клітинному рівні.

Крім того, нестача цинку знижує секрецію і біологічну активність цитокінів – основних сигнальних молекул імунної системи⁴⁶. Це, у свою чергу, зменшує ефективність імунної відповіді та підвищує схильність організму до вірусних інфекцій.

Цинк є необхідним елементом для підтримання бар'єрної функції клітинних мембран. За даними досліджень, дефіцит Zn призводить до підвищення проникності міжклітинних з'єднань епітелію кишечника, особливо в зонах щільних і адгезивних контактів. Це супроводжується активацією міграції нейтрофілів, зростанням синтезу прозапальних цитокінів і надмірною інтенсивністю запальної відповіді. У результаті таких змін відбувається розвиток ускладнень і формується затяжний або хронічний перебіг запальних процесів у кишечнику⁴⁷.

Підтримання гомеостазу цинку є необхідною умовою для нормального функціонування імунної системи, зокрема для процесів кровотворення, дозрівання та диференціювання клітин, а також для збереження стабільного внутрішньоклітинного гомеостазу цинку і повноцінної активності імунокомпетентних клітин⁴⁸.

Поряд із цинком, важливу роль у забезпеченні метаболічної рівноваги та імунної стійкості організму відіграє метіонін – незамінна сірковмісна амінокислота, яка виступає попередником багатьох біологічно активних

⁴⁵ Акімов О. Є., Кузнецова Т. Ю., Соловійова Н. В., Міщенко А. В., Заколodна О. Е., Соловійов В. В. Роль цинку в організмі людини та шляхи подолання його дефіциту. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2023. Т. 23, № 3. С. 246–249.

⁴⁶ Li D., Stovall D. B., Wang W., Sui G. Advances of zinc signaling studies in prostate cancer. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 2. Art. 667.

⁴⁷ Lazzarini M., Wanzira H. Oral zinc for treating diarrhoea in children. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016. No. 12. Art. CD005436.

⁴⁸ Maares M., Haase H. Zinc and immunity: An essential interrelation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 611. P. 58–65.

сполук, зокрема S-аденозилметіоніну, цистеїну та глутатіону. Завдяки цьому метіонін бере участь у реакціях метилювання, антиоксидантному захисті клітин і детоксикаційних процесах⁴⁹.

Він тісно пов'язаний із мікроелементами антиоксидантної дії, такими як селен і цинк, оскільки забезпечує синтез глутатіону – ключового ендogenous антиоксиданту, що підтримує редокс-гомеостаз і стабільність клітинних структур. Отже, метіонін розглядається не лише як амінокислота білкового обміну, а й як важливий регулятор антиоксидантної системи організму⁵⁰.

Метіонін бере участь у синтезі цистеїну, карнітину, адреналіну, холіну, а також сприяє детоксикації печінки шляхом активації метилтрансферазних систем. Завдяки цим властивостям метіонін проявляє гепатопротекторну та антиоксидантну дію, знижує рівень ліпідної інфільтрації гепатоцитів і підтримує синтезуючу функцію печінки. Крім того, метіонін бере участь у синтезі білків і фосfolіпідів, сприяє регенерації клітин, регулює вміст гомоцистеїну в крові, тим самим зменшуючи ризик оксидативного стресу⁵¹.

Отримані результати Андрієнком Л. М. (2019) підтверджують, що метіонін є лімітуючою амінокислотою у формуванні м'язової маси, синтезі структурних білків і ферментів. Його достатнє надходження сприяє підвищенню енергетичної ефективності обміну речовин, зниженню катаболізму і покращенню засвоєння азоту, що відображається у підвищених приростах живої маси⁵².

Метіонін сприяє нормальному функціонуванню підшлункової залози та бере участь у синтезі й обміні холіну, вітаміну B₁₂ і фолієвої кислоти, разом із якою забезпечує ефективніше використання ліпідів корму тваринами. Ця незамінна амінокислота є важливою для росту, регенерації та поділу клітин, а також – разом із цистином – виступає основним структурним компонентом кератину, необхідного для формування вовни у овець та пір'я у птиці. За даними низки дослідників, метаболізм

⁴⁹ Янко Р. В. Вплив метіоніну на морфологічні зміни щитоподібної залози щурів. *Ендокринологія*. 2019. Т. 24, № 1. С. 41–45.

⁵⁰ Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодяку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120

⁵¹ Ostapuk A. O., Gutyj B. V., Kozenko O. V., Dvyluk I. V., Shcherbatyi A. R., Magrelo N. V., Martyshuk T. V., Klym H. V., Krempa N. Yu., Vus U. M., Vysotskyi A. O. The influence of milk thistle, metifen and silimevit on the protein synthesis function of the liver of laying hens under cadmium load. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 26, No. 115. P. 57–63.

⁵² Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодяку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120.

метіоніну тісно пов'язаний із обміном цинку, що вказує на їхню взаємну участь у процесах білкового синтезу та трофічного забезпечення клітин⁵³.

Суттєвим є те, що метіонін належить до ліпотропних сполук, які запобігають розвитку жирової дистрофії печінки. Завдяки наявності метильних груп, він бере участь у синтезі фосфоліпідів, які використовуються клітинами печінки для регенерації та відновлення структурних компонентів, а їх надлишок із током крові транспортується до інших органів і тканин. Метіонін також стимулює утворення холіну, що у поєднанні з триацилгліцєролами формує холінфосфати, які забезпечують виведення ліпідів із печінки в кров'яне русло, запобігаючи накопиченню жирів і розвитку гепатодистрофії⁵⁴ [119].

Результати дослідження Р. В. Янко вказують, що додаткове введення метіоніну у дозі 250 мг/кг стимулює синтетичну активність цитоподібної залози, викликаючи зменшення колоїду, посилення секреції гормонів і регенеративних процесів у паренхімі. Це підтверджує, що метіонін може використовуватися як метаболічний коректор ендокринної функції, сприяючи стабілізації обмінних процесів і підвищенню адаптивних можливостей організму тварин за дії стресових або токсичних чинників [107].

У комплексному застосуванні селен, цинк і метіонін мають виражений синергічний ефект, підсилюючи антиоксидантну систему організму, зменшуючи прояви інтоксикацій і стимулюючи адаптаційно-захисні реакції. Їх поєднання з вітамінами Е та В₁₂ доцільне для метаболічної корекції у тварин, які перебувають під впливом токсикантів (зокрема солей важких металів), у періоди інтенсивного росту, лактації чи репродуктивної активності.

ВИСНОВКИ

Сучасні підходи до підвищення резистентності організму тварин передбачають використання антиоксидантів, вітамінів, мікроелементів і вітаміноподібних речовин, що нормалізують клітинний метаболізм і підтримують функціональну активність антиоксидантної системи. Серед них особливе значення мають вітаміни Е, В₁₂, селен, цинк, метіонін і L-карнітин, які проявляють виражені гепатопротекторні, антиоксидантні, антигіпоксичні та імуномодулювальні властивості. Їх поєднане застосування сприяє активації глутатіонпероксидазної системи, стабілізації клітинних мембран, запобіганню накопиченню

⁵³ Кішак І. Т. Виробництво і застосування преміксів. Київ : Урожай, 1995. 350 с.

⁵⁴ Church D. C., Pond W. G. Basic animal nutrition and feeding. New York : John Wiley & Sons, 1998. 472 p.

токсичних метаболітів, а також підвищує стійкість тварин до дії техногенних факторів.

Отже, зростання техногенного навантаження на агроєкосистеми вимагає розроблення та впровадження комплексних біохімічних і фізіологічних методів корекції, спрямованих на зменшення токсичного впливу важких металів. Використання антиоксидантів, мікроелементів і вітаміноподібних сполук є ефективним напрямом профілактики метаболічних порушень і підтримання гомеостазу у тварин, забезпечуючи збереження їхнього здоров'я, продуктивності та якості тваринницької продукції в умовах антропогенного тиску.

АНОТАЦІЯ

Обґрунтовано доцільність комплексного застосування антиоксидантів, вітамінів і метаболічних коректорів як ефективного напрямку профілактики та корекції токсико-індукованих порушень. Узагальнено дані щодо ролі L-карнітину як метаболічного коректора з антиоксидантною, антистресовою, мембранопротекторною та імунomodуювальною дією; розкрито значення вітамінів E і B₁₂ у підтриманні метаболічної рівноваги, кровотворення, функціонального стану печінки та імунної реактивності. Особливу увагу приділено біологічній ролі селену, цинку та метіоніну як ключових компонентів антиоксидантної системи, кофакторів ферментів захисту (глутатіонпероксидаза, супероксиддисмутаза) і регуляторів детоксикаційних процесів. Підкреслено синергічний ефект поєданого використання зазначених нутрієнтів і метаболічних коректорів у схемах профілактики та лікування, що забезпечує зміцнення природної резистентності, підвищення адаптаційного потенціалу та стабілізацію продуктивності тварин в умовах техногенного навантаження.

Література

1. Мартишук Т. В., Гутий Б. В. Імунофізіологічний стан та антиоксидантний потенціал організму поросят за умов оксидативного стресу та дії коригуючих чинників : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2021. 108 с.
2. Li J., Liu L., Weng J., Yin T. L., Yang J., Feng H. L. Biological roles of L-carnitine in oocyte and early embryo development. *Molecular reproduction and development*. 2021. Vol. 88, no. 10. P. 673–685.
3. Karam K. M., Alebady A. S., Al-Nailey K. G. C., Al-Delemi D. H. J. L-Carnitine effect on induced hyperlipidemia on premature rats: fertility profile. *Journal of medicine and life*. 2022. Vol. 15, no 1. P. 124–131.
4. Єфімов В. Г., Костюшкевич К. Л., Дідик К. О., Алексєєва Н. В. Вплив L-карнітину на морфологічні показники крові поросляту період

відлучення. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2011. № 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2011_2_28

5. Криницька І. Я., Марущак М. І., Лазарчук О. В., Мудра А. Є., Яворська С. І., Габор Г. Г. Вплив карнітину хлориду на показники протеїназо-інгібіторної системи у щурів за умови гострого алкогольного отруєння на тлі інтоксикації солями кадмію та свинцю. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2010. № 1. С. 79–82.

6. Гембаровський М. В. (2013). Вплив L-карнітину на показники ендогенної інтоксикації за умови експериментального токсичного ураження парацетамолом на тлі харчової депривації. *Медична хімія*. 2013. Т. 15, № 2. С. 68–71.

7. Gu S., Wang W., Ye G., Chen C., Zhou Y., Guo L., Zhong S., Li X., Fu X., Wen C., Tang L., Sun J., Hou J., Li Y. Hepatocyte-Derived L-Carnitine Restricts Hepatitis B Surface Antigen Loss Through an Immunosuppressive Effect on Germinal Center-Related Immune Cells. *The Journal of Infectious Diseases*. 2022. Vol. 225, No. 11. P. 1955–1966.

8. Цехмістренко С. І., Коберська В. А. Активність ферментів антиоксидантного захисту в еякулятах бугаїв за додавання L-карнітину до розріджувача сперми. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2012. № 8. С. 116–119.

9. Коберська В. А. Вплив L-карнітину у складі раціону бугаїв на ліпідний склад та якість сперми. *Біологія тварин*. 2015. Т. 17, № 1. С. 62–67.

10. Загайко А. Л., Брюханова Т. О., Шинкарьов А. А., Мельник Н. В. Метаболічні ефекти карнітину, роль у розвитку патологій та перспективи клінічного застосування (огляд). *Український біофармацевтичний журнал*. 2016. № 6. С. 17–22.

11. Присяжнюк В. П. Ефективність застосування L-карнітину у комплексному лікуванні хворих на неалкогольну жирову хворобу печінки. *Гепатологія*. 2017. № 1. С. 40–48.

12. Демків І. Я. Вплив карнітину хлориду на показники імунітету та стан антиоксидантної системи у тварин із гострим отруєнням етиловим спиртом на фоні тривалої інтоксикації солями свинцю і кадмію. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Медицина*. 2008. Вип. 33. С. 44–49.

13. П'ятничко О. М., Жила М. І., Шкодяк Н. В., Салій О. О., Деркач М. В., Калиновська Л. В. Ефективність застосування препарату на основі бутафосфану, вітамінів групи В та L-карнітину при лікуванні коней. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гіжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2021. Т. 23, № 101. С. 31–37.

14. Лучин І. С., Сотніченко Ю. М., Невесенко А. В., Білан А. П. Безпечність і продуктивна дія препарату L-карнітину на інтенсивність росту молодняку кролів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 100–112.
15. Lavryshyn Y., Gutyj B., Zhyla M., Kurylas L., Prysiazhniuk V., Khariv I., Voroniak V. Influence of “Metisevit” feed additive and liposomal preparation “Lipointersil” on the level of vitamins in the blood of bulls at experimental chronic cadmium toxicosis. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2020. Vol. 22, No. 100. P. 88–93.
16. Гутий Б. В. Вміст вітамінів А і Е у крові бичків за умов кадмієвої інтоксикації. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2013. № 2. С. 31–33.
17. Al Amin A. S. M., Gupta V. Vitamin B12 (Cobalamin). *StatPearls. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing*, 2023
18. Golovach P., Gutyj B., Kolomiets I., Ostapiv D., Oseredchuk R., Sloboda O. The effect of B groups vitamins (B1, B2, B5, B6, B10, B12) on the activity of antioxidant protection system enzymes and the content of lipid peroxide oxidation products in the blood of feeding cattle. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2023. Vol. 25, No. 112. P. 22–26.
19. Можина Т. Дефіцит вітаміну В12: за матеріалами мультидисциплінарного майстер-класу з проблем діагностики та лікування. *Український медичний часопис*. 2024. № 6. С. 57–60.
20. Сергієнко В. О., Сегін В. Б., Сергієнко О. О. Вітамін В12 і діабетичні нейропатії. *Міжнародний ендокринологічний журнал*. 2024. Т. 20, № 7. С. 481–490.
21. Donnelly J., Appathurai A., Yeoh H. L., Driscoll K., Faisal W. Vitamin E in Cancer Treatment: A Review of Clinical Applications in Randomized Control Trials. *Nutrients*. 2022. Vol. 14, No. 20. Art. 4329.
22. Гутий Б. В. Вплив Метісевіту на вміст вітамінів А і Е у крові бугайців за умов кадмієвого навантаження. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2016. № 11. С. 10–13.
23. Вудмаска І. В., Сачко С. Р., Петрук А. П., Пахолків Н. І., Гудима В. Ю., Скорохід А. В. Корекція біохімічних показників крові корів у перед- і післяотельний періоди шишками хмелю та вітаміном Е. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2019. Т. 21, № 95. С. 117–121.

24. Shklar G., Schwartz J., Trickler D. P., Niukian K. Regression by vitamin E of experimental oral cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 1987. Vol. 78, No. 5. P. 987–992.

25. Купша О. І. Морфофункціональні зміни в печінці мишей при тривалому надходженні в організм малих доз свинцю і вплив на них альфа-токоферолу та ербісолу : автореф. дис. ... канд. біол. наук. Сімферополь, 2010. 17 с.

26. Karpiuk I., Wilczura-Wachnik H., Myśliński A. α -Tocopherol/AOT/alkane/water system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. Vol. 131, No. 3. P. 2885–2892.

27. Naksuriya O., Okonogi S. Comparison and combination effects on antioxidant power of curcumin with gallic acid, ascorbic acid, and xanthone. *Drug Discoveries & Therapeutics*. 2015. Vol. 9, No. 2. P. 136–141.

28. Lewis E. D., Meydani S. N., Wu D. Regulatory role of vitamin E in the immune system and inflammation. *IUBMB Life*. 2018. Vol. 71, No. 4. P. 487–494.

29. Bashchenko M. I., Boiko O. V., Lesyk Y. V., Honchar O. F., Havrysh O. M., Gutyj B. V., Hoivanovych N. K., Krechkiivska H. V. Changes in the blood parameters of rabbits consuming a complex of citrates of zinc, selenium, and germanium under the conditions of heat stress. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 702–708.

30. Ковальова І. В., Антоненко П. П. Динаміка змін продуктивних якостей курей за впливу селену та фітодобавок. *Проблеми зооінженерії та ветеринарної медицини : зб. наук. праць Харківської державної зооветеринарної академії*. Харків, 2018. Т. 35, № 3. С. 145–150.

31. Schomburg L. The other view: the trace element selenium as a micronutrient in thyroid disease, diabetes, and beyond. *Hormones (Athens)*. 2020. Vol. 19, No. 1. P. 15–24.

32. Ковальчук І. І., Проданчук О. В., Лесик Я. В., Цам М. М., Пилипець А. З., Колотницький В. А. Фізіолого-біохімічні показники крові і продуктивність кролів за впоювання нанотехнологічного селену цитрату. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 144–156.

33. Ніщененко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193.

34. Слободян С. О., Гутий Б. В., Мурська С. Д. Вплив селеніту натрію і кормової добавки «Метісевіт плюс» на морфологічні показники крові

щурів за інтоксикації кадмієм і свинцем. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2020. Т. 22, № 97. С. 52–57.

35. Федорченко А. М., Івченко В. М. Показники імунобіологічної реактивності та антиоксидантної системи глибокотільних корів під впливом селенорганічного препарату Сел-Плекс. *Науковий вісник ветеринарної медицини : зб. наук. праць*. Біла Церква, 2012. Вип. 10 (99). С. 112–116.

36. Ніщененко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193.

37. Івченко В. М., Федорченко А. М. Вплив селеновмісного препарату Сел-Плекс на імунобіологічні показники телят, імунізованих проти сальмонельозу. *Науковий вісник ветеринарної медицини : зб. наук. праць*. Біла Церква, 2011. Вип. 8, № 87. С. 45–50.

38. Dhur A., Galan P., Hercberg S. Relationship between selenium, immunity and resistance against infection. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Comparative Pharmacology and Toxicology*. 1990. Vol. 96, No. 2. P. 271–280.

39. Гаранович І. І. Імунний статус великої рогатої худоби в критичні періоди. *Фізіологічний журнал*. 1997. № 3–4. С. 19–24.

40. Dzen Y., Rosalovsky V., Shtapenko O., Slypaniuk O., Salyha Y. Effect of zinc methionine supplementation on biochemical and hematological indices of growing rabbits. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2023. Vol. 29, No. 4. P. 714–722.

41. Юзьяк М. О., Лесик Я. В. Клінічні параметри організму кролів за умов теплового стресу та впливу наночастинок цинку, селену і германію цитратів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 169–184.

42. Григорова Н. В. Динаміка вмісту цинку, магнію та міді в клітинах тимуса тварин за умов введення сульфатів цих металів. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 12. С. 53–60.

43. Haase H., Ellinger S., Linseisen J., Neuhäuser-Berthold M., Richter M., German Nutrition Society (DGE). Revised D-A-CH-reference values for the intake of zinc. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 61. Art. 126536.

44. Нефьодова О. О., Янушкевич К. С. Інтоксикаційний вплив солей свинцю та кадмію на печінку щурів із корекцією сукцинатами цинку

та заліза. *Перспективи та інновації науки* (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»). 2024. № 2. С. 1170–1183.

45. Акімов О. Є., Кузнецова Т. Ю., Соловійова Н. В., Міщенко А. В., Заколадна О. Е., Соловійов В. В. Роль цинку в організмі людини та шляхи подолання його дефіциту. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2023. Т. 23, № 3. С. 246–249.

46. Li D., Stovall D. B., Wang W., Sui G. Advances of zinc signaling studies in prostate cancer. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 2. Art. 667.

47. Lazzzerini M., Wanzira H. Oral zinc for treating diarrhoea in children. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016. No. 12. Art. CD005436

48. Maares M., Haase H. Zinc and immunity: An essential interrelation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 611. P. 58–65.

49. Янко Р. В. Вплив метіоніну на морфологічні зміни щитоподібної залози щурів. *Ендокринологія*. 2019. Т. 24, № 1. С. 41–45.

50. Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодняку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120.

51. Ostapyuk A. O., Gutyj B. V., Kozenko O. V., Dvyliuk I. V., Shcherbatyi A. R., Magrelo N. V., Martyshuk T. V., Klym H. V., Krempa N. Yu., Vus U. M., Vysotskyi A. O. The influence of milk thistle, metifen and silimevit on the protein synthesis function of the liver of laying hens under cadmium load. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 26, No. 115. P. 57–63.

52. Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодняку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120.

53. Кіщак І. Т. Виробництво і застосування преміксів. Київ : Урожай, 1995. 350 с.

54. Church D. C., Pond W. G. Basic animal nutrition and feeding. New York : John Wiley & Sons, 1998. 472 p.

Information about the authors:

Vus Uliana Mykhailivna,

Senior Lecturer at the Department of Hygiene, Sanitation and General
Veterinary Prevention named after Mykhailo Demchuk,
Stepan Gzhytskyi National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv
50, Pekarska street, Lviv, 79010, Ukraine

Hutyy Bohdan Volodymyrovych,
Doctor of Veterinary Sciences, Professor,
Head of the Department of Hygiene, Sanitation and General Veterinary
Prevention named after Mykhailo Demchuk,
Stepan Gzhytskyi National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv
50, Pekarska street, Lviv, 79010, Ukraine