

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЛОГІЇ ТВАРИН

НАУКОВА РОБОТА

на присудження Премії Верховної Ради України імені Ігоря ЮХНОВСЬКОГО

**РЕГУЛЯТОРНА ДІЯ ЦИТРАТІВ ZN, GE I SE У НАНОФОРМІ НА
БІОХІМІЧНИЙ ПРОФІЛЬ КРОВІ КРОЛІВ ЗА УМОВ ТЕПЛОВОГО
СТРЕСУ**

(галузь знань 09 – «Біологія», спеціальність 091 – «Біологія»)

Юзьвяк Мар'ян Осипович,
науковий співробітник Інституту біології тварин Національної академії
аграрних наук України, доктор філософії,
1997 р.н.

ТОМ № 2

2027

ОПИС ДОКУМЕНТІВ ТОМУ 2

Опис документів тому 2.....	2 с.
Опис роботи.....	3-52 с.
Анотація розділу колективної монографії.....	53 с.
Анотація методичних рекомендацій.....	54-55 с.
Додаток А. Патент України на корисну модель.....	56 с.
Додаток Б. Акт впровадження в освітній процес.....	57 с.
Додаток В. Довідка про впровадження результатів дослідження.....	58 с.
Додаток Г. Подяка Департаменту агропромислового розвитку Львівської обласної державної адміністрації.....	59 с.

ОПИС РОБОТИ

доктора філософії, наукового співробітника лабораторії фізіології, біохімії та живлення птиці Інституту біології тварин НААН
Юзв'яка Мар'яна Осиповича на тему «Регуляторна дія цитратів Zn, Ge і Se у наноформі на біохімічний профіль крові кролів за умов теплового стресу»

СТИСЛИЙ ЗМІСТ КОНКУРСНОЇ РОБОТИ

Конкурсна робота представляє цикл праць, що розкриває вплив сполук наночастинок цинку, селену і германію цитратів на біохімічний профіль крові кролів за норми та дії помірної й сильного теплового стресу. Проведено дві серії досліджень за випоювання молодняку кролів після відлучення наночитратами Zn, Ge і Se в умовах помірної (27,8–28,9 °C) та сильного (28,9–30 °C) теплового стресу. Встановлено особливості зміни гематологічного профілю, біохімічних показників, антиоксидантного стану, ліпідного і фосфоліпідного складу крові та вмісту мікроелементів у тканинах організму кролів. Експериментально доведено позитивний вплив цинку, селену та германію цитратів за умов теплового стресу на перебіг обмінних процесів організму кролів. Найбільш виражений вплив встановлено за випоювання наночастинок цинку та селену цитратів, що позначилось покращенням гематологічних та біохімічних показників, активацією антиоксидантного захисту, ліпідного, фосфоліпідного і мінерального обміну. Германію цитрат мав менш виражену дію на біохімічні показники крові кролів за умов різного рівня теплового стресу, що можливо пов'язано з його опосередкованим впливом та метаболізмом в організмі кролів.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА НАУКОВА НОВИЗНА КОНКУРСНОЇ РОБОТИ

В умовах глобального потепління, аномальні температури докілья призводять до теплового стресу і становлять загрозу для галузі тваринництва [[Bashar, A. M., 2024](#); [Fotso-Nguemo, T. C., 2023](#)]. За даними звіту Всесвітньої метеорологічної організації прогнозується, що середня глобальна температура в період з 2025 по 2029 роки перевищить 1,5 °C, що матиме серйозні наслідки для тваринництва [[WMO, 2025](#)]. Кролі за біологічними особливостями є чутливими до високих температур, оскільки не здатні ефективно регулювати температуру тіла, через обмежену здатність до терморегуляції [[Liu, H., 2022](#)]. Високі температури докілья порушують фізіологічну і метаболічну активність в організмі, що викликає оксидативний стрес, погіршує показники росту й розвитку, призводить до економічних втрат у кролівництві [[El-Ratel, I. T., 2024](#)].

Кролі – гомеотермні тварини і регулюють температуру тіла у вузькому діапазоні [[Szendrő, Z., 2018](#)]. Відсутність потових залоз негативно впливає на терморегуляцію кролів за підвищеної температури докілья [[Yagci, A., 2006](#)]. Вуха у кролів займають приблизно 12 % площі поверхні тіла та беруть участь в терморегуляції. Це пояснюється наявністю великої кількості кровоносних судин, зокрема артеріовенозних анастомозів, що сприяють ефективному теплообміну [[Zeferino, C. P., 2011](#)]. Оптимальна температура докілья для

кролів становить від 18 до 21 °C, а рівень вологості – від 55 до 65 % [[Marai, I. F. M., 2002](#)]. Відомо, що тепловий стрес спричиняє зниження добового приросту маси тіла на 20 – 25 %, коефіцієнта конверсії корму 8 – 15 %, збільшення загибелі кролів на 9 – 12 % та зменшення відтворювальної функції на 6 – 10 %, а також негативно впливає на якість м'яса [[Liang, Z. L., 2022](#); [Marai, I. F. M., 2021](#); [Marai, I. F. M., 2007](#); [Yan, J. Y., 2017](#)].

За умов теплового стресу порушуються процеси терморегуляції у кролів, що зумовлюють надмірне утворення активних форм Оксигену (АФО) [[Jimoh, O. A., 2017](#)]. Баланс між утворенням та видаленням вільних радикалів забезпечується антиоксидантною системою організму. Проте, за умов підвищених температур окисно-відновний стан клітини порушується. Збільшення АФО активує ядерний фактор еритроїдного другого типу (Nrf2), що переміщується в ядро клітини та активує експресію генів антиоксидантних ензимів, що нейтралізують вільні радикали, забезпечуючи фізіологічні функції клітини [[Jiang, T., 2010](#); [Ma, C., 2011](#)]. На початкових етапах теплового стресу активність антиоксидантної системи зростає. При тривалому тепловому стресі захисні можливості антиоксидантної системи виснажуються, що зумовлює накопичення АФО та розвиток оксидативного стресу [[Liang, Z. L., 2022](#)].

Тепловий стрес знижує споживання корму у кролів через вплив на центр голодування у нижньому таламусі та активацією симпатичної нервової системи, що зменшує засвоюваність корму за підвищених температур [[Bakr, M. H., 2015](#)]. Зменшення споживання корму призводить до зниження надходження поживних речовин, зменшення кількості протеїну, швидкості росту, розмноження та спричиняє загибель тварини [[Bahga, C. S., 2010](#); [Liang, Z. L., 2022](#)].

У сучасному промисловому тваринництві важливим напрямом підвищення ефективності живлення є пошук біодоступних і безпечних форм мікроелементів [[Abdelnour, S. A., 2021](#)]. Традиційні неорганічні солі характеризуються низьким коефіцієнтом засвоєння в організмі, високою токсичністю та значними накопиченнями у довкіллі. Одним з перспективних наукових методів є використання мінеральних речовин в органічній сполуці наночастинок, виготовлених за допомогою методів нанотехнології. Наносполуки мікроелементів завдяки надмалій дисперсності, великій питомій поверхні та здатності проникати крізь біологічні мембрани забезпечують кращу біодоступність, антиоксидантну активність і метаболічну стабільність [[Fallah, A., 2018](#); [Hassan, F., 2021](#)]. Їх використання сприяє підвищенню імунної реактивності, продуктивності та резистентності тварин до стресових чинників. Тому, дослідження біологічної дії нано мікроелементів у сполуці з органічними кислотами порівняно з традиційними солями є актуальним і перспективним напрямом сучасної біологічної науки.

Для зменшення негативної дії підвищених температур довкілля значну увагу сучасних наукових досліджень зосереджено на використанні мінеральних сполук, виготовлених методами нанотехнології [[Abdelnour, S. A., 2021](#)]. Наночастинки є стабільні при високій температурі і тиску [[Stoimenov, P. K.,](#)

[2002](#)], легко засвоюються в шлунково-кишковому тракті та ефективно виконують свої функції в організмі тварини. Порівняно зі звичайними мінеральними речовинами, наночастинки можна давати у менших дозах, що дозволяє знизити витрати на корм і мінімізувати забруднення навколишнього середовища [[Michalak, I., 2022](#); [Swain, P. S., 2015](#)]. Встановлено, що токсичність наночастинок селену є нижчою у три рази, ніж органічного селену, і в сім разів нижча, ніж неорганічного селену [[Shafi, B. U. D., 2020](#)]. Таким чином, порівняно з органічними та неорганічними речовинами, наночастинки мають широкий спектр біологічної дії, характеризуються високою поверхневою і каталітичною активністю, низькою токсичністю та адсорбуючими властивостями в організмі [[Swain, P. S., 2015](#)].

З літературних джерел відомо, що Селен відіграє важливу роль в репродуктивній системі, функціонуванні імунітету та антиоксидантному захисті організму ссавців. Цинк є кофактором понад 200 ензимів, забезпечує обмін протеїну, ліпідів та вуглеводів, бере участь у регуляції мінерального обміну. Германій характеризується низькою токсичністю, протизапальними, протипухлинними та антиоксидантними властивостями в організмі. Перелічені мікроелементи відіграють важливі функції в організмі і характеризуються низьким коефіцієнтом біодоступності, це дуже важливо для кролів, які за біологічними особливостями характеризуються надзвичайно низьким рівнем засвоєння поживних речовин.

Дослідженнями Камель та ін. (2020) з'ясовано, що додавання до раціону кролів 50 мг ZnO/кг або 30 мг нано-Zn/кг у раціоні, підвищують рівень відновленого глутатіону, глутатіон-S-трансферази, супероксиддисмутази, імуноглобулінів IgG та IgM, та ліпопротеїдів високої щільності (ЛПВЩ), при цьому знижується концентрація триацилгліцеролів та продуктів, що реагують з тіобарбітуровою кислотою (ТБК-активних продуктів) у сироватці крові кролів за умов теплового стресу [[Kamel, D. A., 2020](#)]. Порівняно з неорганічним селеном, селену цитрат володіє вищою абсорбційною та каталітичною активністю, є менше токсичним [[Alagawany, M., 2021](#); [Ali, A. A., 2021](#); [Al-Quwaie, D. A., 2023](#)]. Дослідженнями Айят та ін. (2018) встановлено, що згодовування органічного селену 0,03 мг/кг раціону кролів пом'якшило несприятливий вплив теплового стресу, що позначилося зниженням ректальної температури, частоти дихання та серцевих скорочень у літній період [[Ayyat, M. S., 2018](#)]. Додаткове споживання германію цитрату у дозах 2 – 20 мкг/кг маси тіла позитивно впливає на фізіологічні та біохімічні процеси, функцію імунної, антиоксидантної, репродуктивної систем організму щурів [[Fedoruk, R. S., 2022](#)]. Результати досліджень вказують на активуючий вплив на мінеральний, ліпідний і протеїновий обмін на додавання до корму або питної води германію цитрату в організмі свиней [[Kuldonashvili, K. V., 2016](#)], курчат-бройлерів [[Бусол, В. О., 2013](#)], перепелів [[Nischemenko, N., 2014](#)] та бджіл [[Kikish, I. B., 2021](#); [Kovalchuk, I. I., 2020](#); [Yakubchak, O. M., 2019](#)].

Грунтовний аналіз наукової літератури з дослідження впливу мікроелементів на організм тварин та способів пом'якшення негативної дії

теплого стресу за аліментарного використання органічних сполук мінеральних речовин свідчить, що в умовах глобальних змін клімату та антропогенного навантаження, проблема теплового стресу є ключовою у тваринництві. Підвищення температура довкілля призводить до порушення терморегуляції, негативних змін фізіологічних і біохімічних процесів та збільшенні оксидативного стресу в організмі тварин.

Серед різноманітних підходів у зменшенні негативного впливу теплового стресу на тварин за промислового утримання вирізняються мінеральні речовини виготовленні за допомогою методів нанотехнології. У численних експериментах встановлено, що мікроелементи у нанорозмірах, зв'язані з органічними кислотами беруть участь у перебігу обміну речовин у результаті чого захищають клітини від АФО, активують імунну та репродуктивну функцію, зменшують забруднення довкілля, покращують гематологічні і біохімічні показники крові за рахунок високої біодоступності в організмі. Додавання до раціону кролів органічних сполук наномікроелементів забезпечує ефективне засвоювання в організмі тварин, завдяки підвищеній біодоступності порівняно з неорганічними солями мікроелементів, що дозволяє використовувати їх у меншій кількості без втрати біологічної ефективності. Аналіз літературних джерел щодо впливу на організм тварин мікроелементів Цинку, Селену і Германію, свідчить про їх важливість у перебігу обміну речовин в організмі кролів. Однак, питання фізіологічно обґрунтованої кількості наносполук цих елементів за умов помірного і сильного теплового стресу, досі залишається не дослідженим. Слід підкреслити, що в літературних джерелах висвітлюється біологічна активність органічних частинок Zn, Se і Ge та їх вплив на активність метаболічних процесів у середині клітини, проте відсутнє дозування цих мікроелементів, залежно від інтенсивності теплового стресу на організм кролів, що потребує проведення ґрунтовних наукових досліджень.

У вітчизняній та зарубіжній літературі практично відсутня інформація щодо використання сполук наномікроелементів у раціоні для зменшення негативного впливу різної інтенсивності дії теплового стресу у кролів. Проте, частково описується їх вплив на фізіологічні показники та біохімічний профіль крові організму тварин. Проведений аналіз вищезазначеної наукової літератури свідчить, що нормування сполук наночастинок цинку, селену та германію цитратів для кролів у світі не розроблено.

Тому, актуальним є проведення дослідження крові кролів за впливу теплового стресу та його коригування за вживання наночастинок цинку, селену та германію цитратів. Виконання даного дослідження дозволить науково обґрунтувати параметри морфологічних і біохімічних показників крові, антиоксидантну здатність, ліпідний і фосфоліпідний склад крові молодняку кролів за умов помірного та сильного теплового стресу і додаткового застосування у їх раціоні цинку, селену та германію цитратів, що і визначило вибір теми дослідження.

Метою роботи було дослідити біохімічні показники крові кролів під впливом помірного та сильного теплового стресу за впоювання наночастинок цинку, селену і германію цитратів та обґрунтувати їх ефективність за аліментарного застосування для пом'якшення негативної дії високих температур довкілля.

НАУКОВА НОВИЗНА

Вперше з'ясовано особливості впливу різних сполук наночастинок цинку, селену і германію цитратів, отриманих методами нанотехнології, на морфологічні та біохімічні показники, стан системи антиоксидантного захисту, ліпідний і фосфоліпідний профіль крові кролів за умов помірного та сильного теплового стресу. Вперше показано регуляторну дію досліджуваних сполук за їх використання у фізіологічно обґрунтованих дозах на інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів і показники ліпідного обміну, особливо за умов помірного теплового стресу. Результати експериментів суттєво поглиблюють розуміння перебігу механізмів впливу органічних сполук цинку, селену і германію цитратів на метаболічні процеси у період інтенсивного росту кролів.

Доведено, що застосування цитратів цинку та селену більшою мірою знижує негативний вплив теплового стресу на організм кролів, що проявляється нормалізацією гематологічних та метаболічних показників. Отримано нові дані щодо впливу цитратних сполук цинку, селену та германію на вміст Феруму, Мангану, Купруму, Кобальту, Нікелю, Кадмію та Плюмбуму в крові, тканинах печінки, нирок, м'язів та шерсті кролів, що позначилося суттєвими змінами за використання селену цитрату в умовах сильного теплового стресу.

За результатами проведених досліджень отримано деклараційний патент України на корисну модель «Спосіб підвищення продуктивності кролів» (№ 162185 від 04.03.2026) (Додаток А).

ОРИГІНАЛЬНІСТЬ, ОБґРУНТОВАНІСТЬ МЕТОДОЛОГІЇ ЧИ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОСНОВНИХ ІДЕЙ, ПРОПОЗИЦІЙ

Оригінальність методичного підходу полягає в тому, що вплив наносполук Zn, Se і Ge вивчали за двох рівнів теплового стресу – помірного (27,8–28,9 °C) та сильного (28,9–30 °C), які створювали у віварії в контрольованих умовах за температурно-вологісним індексом, на відміну від багатьох досліджень, виконаних за природного літнього підвищення температури. Це дало змогу оцінити ефективність кожного мікроелемента залежно від інтенсивності стресового чинника. Цитрати мікроелементів застосовували у наноформі, розмір частинок якої підтверджено методом трансмісійної електронної мікроскопії. Сполуки впоювали кожній тварині індивідуально з розрахунку на 1 кг маси тіла, що дозволяло точно контролювати їх надходження незалежно від споживання корму за умов різної інтенсивності теплового стресу. Комплексна оцінка стану організму охоплювала гематологічні та біохімічні показники, систему антиоксидантного захисту, ліпідний і фосфоліпідний склад крові та вміст мікроелементів у крові, печінці, нирках, м'язах і шерсті.

Схема і методика проведення досліджень

Дослідження проводили впродовж 2023 – 2024 років у лабораторії інтелектуальної власності та аналітичних досліджень Інституту біології тварин НААН. Метою експериментів було вивчити біохімічні зміни крові молодняку кролів-аналогів породи Термонська біла у період з 35 до 78 добового віку за умов помірного і сильного теплового стресу та пом'якшення його негативного впливу за додаткового вполювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів. Усі маніпуляції з піддослідними тваринами проводили з дотриманням принципів Національного центру заміни, удосконалення та скорочення використання тварин у дослідженнях (NC3Rs: Replacement, Reduction, Refinement), положень «Загальних етичних принципів експериментів на тваринах», затверджених на Першому національному конгресі з біоетики (Київ, 2001 р.), керівних принципів «Європейської конвенції про захист хребетних тварин» (Страсбург, 1986), Директиви Ради Європи №2010/63/ЄС, закону України № 3447-IV «Про захист тварин від жорстокого поводження» [[Закон України № 3447-IV, 2006](#)], згідно з протоколом №146 від 19.02.2024 року на засіданні комісії з питань етики наукових досліджень, експериментальних розробок Інституту біології тварин НААН.

З метою виконання поставлених задач було проведено дві серії досліджень, з вивчення впливу підвищених температур довкілля на організм кролів після відлучення та зниження негативного впливу за введення цитратів мікроелементів. Для цього тварин утримували в приміщенні віварію у сітчастих клітках розміром 50×120×30 см. Впродовж експерименту 4 години на добу підвищували температуру в приміщенні за допомогою регульованих електричних нагрівачів повітря, що створювало умови теплового стресу.

В першому досліді, за умов помірного теплового стресу кролів утримували за температури від 27,8 до 28,9 °С та відносної вологості від 83,4 до 87,7 %. У другому досліді, за умов сильного теплового стресу, температура становила від 28,9 до 30 °С та відносної вологості від 78,1 до 87,4 %.

Для оцінки температурно-вологісного індексу (ТВІ) використовували вимірювально-обчислювальний комплекс (ВОК) АПСЕ-М та методику безперервної автоматичної реєстрації, що проводила одне вимірювання через кожні три секунди, з наступним усередненням 40 вимірювань параметра та його записом в карту пам'яті (Патент № 127047) [[Небилиця, М. С., 2019](#)]. Під час проведення дослідження використовували термогігрометр Trotec BL30, що відображав поточні показники температури, вологості та часу. Використання двох приладів, дозволяло забезпечити більш точну оцінку ТВІ в умовах дослідження.

Тварин для дослідження формували у групи по 6 тварин (контрольна і три дослідні), середньою масою тіла 980±50 г за помірного теплового стресу та 1200±50 г за умов сильного теплового стресу.

Кролі контрольної групи отримували основний раціон (ОР) із стандартним збалансованим гранульованим комбікормом і водою без обмежень. Кролі I, II і III дослідних груп споживали, такі ж комбікорми, як у контролі, проте впродовж 24 годин з водою отримували: I група – цинку цитрат – 60 мг/л або 12

мг/кг маси тіла; II група – селену цитрат – 300 мкг/л або 60 мкг/кг маси тіла; III група – германію цитрат – 62,5 мкг/л або 12,5 мкг/кг маси тіла (табл. 1).

Використання окремих поїлок для кожної тварини та розміщення тварин індивідуально у клітці дозволило контролювати кількість спожитої води та заданої сполуки, кожним кролем.

Таблиця 1

Загальна схема проведення експериментів на кроликах

Етапи досліджень	Характеристика тварин, умови утримання	Раціон
Дослід – I	Кролі породи Термонська біла, тривалість дослідження від 35 до 78 добового віку. Маса тіла 980 ± 50 г. Кліматичний режим: помірний тепловий стрес ($27,8 - 28,9$ °C); відносна вологість ($83,4 - 87,7$ %). Тривалість помірного теплового стресу – 4 години на добу.	Контрольна група – ОР (збалансований гранульований комбікорм і вода без обмеження). I група (Д – I) – цинку цитрат – 12 мг/кг маси тіла або 60 мг/л; II група (Д – II) – селену цитрат – 60 мкг/кг маси тіла або 300 мкг/л;
Дослід – II	Кролі породи Термонська біла, тривалість дослідження від 35 до 78 добового віку. Маса тіла 1200 ± 50 г. Кліматичний режим: сильний тепловий стрес ($28,9 - 30$ °C); відносна вологість ($78,1 - 87,4$ %). Тривалість сильного теплового стресу – 4 години на добу.	III група (Д – III) – германію цитрат – 12,5 мкг/кг маси тіла або 62,5 мкг/л.

Показники крові кролів досліджували на 14 добу підготовчого періоду та на 14 і 29 доби дослідження за умов помірного та сильного теплового стресу. На 14 добу підготовчого періоду у кролів проводили відбір крові для з'ясування біохімічних показників за відсутності теплового стресу та добавок у раціоні. Підготовчий період тривав 14 діб і був необхідний для адаптації тварин до умов віварію, що забезпечило достатньо часу для того, щоб тварини адаптувалися до нових умов утримання, і дозволило забезпечити стабільні показники. У наступні 14 і 29 добу експерименту досліджували вплив теплового стресу та його пом'якшення за впоювання цитратної сполуки наночастинок мікроелементів.

Методи дослідження

Для досліджень клітин крові відбирали її з крайової вушної вени кролів у пробірки з антикоагулянтном етилендіамінтетраацетат (EDTA-K^{2+}) і визначали загальну кількість еритроцитів та еритроцитарні індекси: абсолютний вміст еритроцитів, середній об'єм еритроцита, гематокрит, середній вміст гемоглобіну в еритроциті, середню концентрацію гемоглобіну в еритроциті,

ширину розподілу еритроцитів за об'ємом; кількість лейкоцитів та їхні форми – лімфоцити, моноцити, гранулоцити; кількість тромбоцитів та тромбоцитарні індекси: абсолютний вміст тромбоцитів, середній об'єм тромбоцитів, тромбокрит, відносну ширину розподілу тромбоцитів за об'ємом за допомогою автоматичного гематологічного аналізатора *Orphee Mythic 18* (Швейцарія).

Для біохімічних досліджень, як антикоагулянт використовували 1 % розчин гепарину і визначали у плазмі крові вміст загального протеїну, альбуміну, активність аланінамінотрансферази (АЛТ) та аспартатамінотрансферази (АСТ), активність лужної фосфатази (ЛФ), вміст триацилгліцеролів (ТАГ), холестеролу, загального Кальцію та неорганічного Фосфору за допомогою біохімічного аналізатора *Hymalyzer 2000* [Влізло, В. В., 2012]. Впродовж дослідження контролювали масу тіла тварин, визначали температуру вуха [Marai, I. F. M., 2004], частоту дихання [Jimoh, O. A., 2018], ректальну температуру [Askar, A. A., 2012], частоту серцевих скорочень [Abdalla, M. A., 2009]. Визначення вмісту загального протеїну за методом Лоурі [Влізло, В. В., 2012]. Визначення концентрації продуктів пероксидного окиснення ліпідів [Влізло, В. В., 2012]. Визначення концентрації ТБК-активних продуктів [Влізло, В. В., 2012]. Визначення супероксиддисмутази активності (СОД: К.Ф. 1.15.1.1.) [Влізло, В. В., 2012]. Визначення каталази активності (КАТ: К.Ф. 1.11.1.6.) [Влізло, В. В., 2012]. Визначення глутатіонпероксидази активності (ГП: К.Ф. 1.11.1.9.) [Влізло, В. В., 2012]. Визначення глутатіонредуктази активності (ГР: К.Ф. 1.6.4.2.) [Carlberg, I., 1985]. Визначення концентрації відновленого глутатіону (ВГ) [Влізло, В. В., 2012]. Екстрагування ліпідів за методом Фолча [Влізло, В. В., 2012]. Визначення концентрації загальних ліпідів гравіметричним методом [Влізло, В. В., 2012]. Визначення вмісту окремих класів ліпідів методом тонкошарової хроматографії [Влізло, В. В., 2012]. Визначення вмісту окремих класів фосфоліпідів методом тонкошарової хроматографії [Влізло, В. В., 2012]. У крові та тканинах печінки, нирок, м'язів, та шерсті визначали вміст Fe, Mn, Cu, Co, Ni, Cd, Pb з використанням атомно-абсорбційного спектрофотометра СФ-115 ПК [Влізло, В. В., 2012].

Визначення температурно-вологісного індексу (ТВІ) [Marai, I. F. M., 2002].

Межі комфортних умов утримання кролів визначали за ТВІ показником. Середньодобову температуру повітря та відносну вологість визначали за формулою:

$TBI = T - ((0,31 - 0,31 \times B/100) \times (T - 14,4))$, де: ТВІ = індекс температури і вологості; Т = температура (°C); В = відносна вологість у відсотках (%).

Отримані значення ТВІ були класифіковані, де < 27,8 °C – відсутність теплового стресу; 27,8 – 28,9 °C – помірний тепловий стрес; 28,9 – 30,0 °C – сильний тепловий стрес; > 30,0 °C – дуже сильний тепловий стрес.

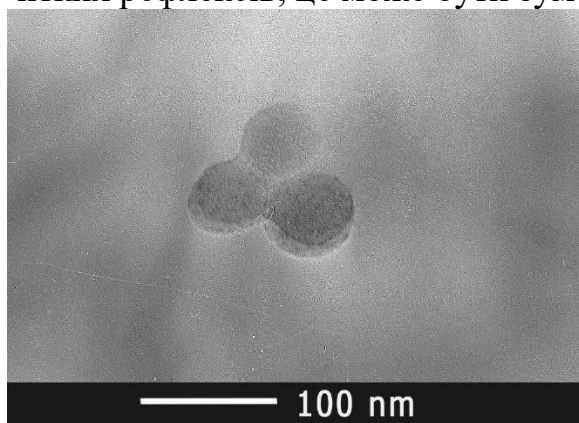
Статистична обробка результатів

Обчислення результатів дослідження проводили з використанням пакету програм «STATISTICA» 7.0 («Statsoft», США). Експериментальні дані виражали, як середнє значення (М) ± та середньоквадратичне відхилення (SD).

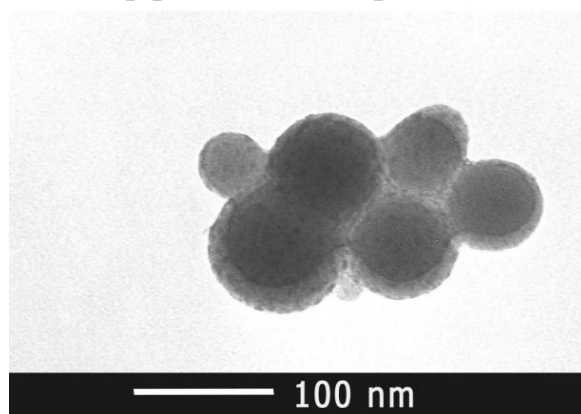
Результати розраховували однофакторним дисперсійним аналізом (ANOVA), для виявлення статистичних відмінностей між контрольною та дослідними групами використовували апостеріорний критерій (*post-hoc test*) – метод *Tukey HSD*, відмінності вважали достовірними при $P \leq 0,05$ [Петровська, І., 2022].

Фізичні характеристики наночастинок та метод їхнього отримання

Для вивчення розміру наночастинок цинку, селену та германію цитратів в Інституті проблем матеріалознавства імені Францевича Національної академії наук України використовували трансмісійний електронний мікроскоп JEM 100CX II (Японія) при збільшенні 100 000 разів. Під час проведення дослідження стандартну мідну сітку для електронно-мікроскопічних досліджень, покриту тонким шаром карбону, розміщували на фільтрувальному папері. За допомогою мікродозатора на сітку наносили 1 – 2 краплі досліджуваної цитратної сполуки мікроелемента. Після висихання сітку встановлювали в тримач зразків мікроскопа, який після вакуумування у шлюзі переміщувався у колонну мікроскопа для проведення визначення. Додатково виконували фотографування мікродифракційних ґраток з подальшим розрахунком параметрів кристалічної ґратки і порівнянням з табличними значеннями. Зображення наночастинок селену цитрату отримати не вдалося. Це пов'язано з тим, що Селен має низький тиск насичених парів, який призводить до його інтенсивного випаровування при потраплянні у вакуум. Внаслідок цього, під час мікроскопічних досліджень, наночастинки селену цитрату швидко випаровуються, що ускладнює отримання чітких зображень. Тому у роботі використовували інформацію розробника про розмір наночастинок селену від 20 до 40 нм. Варто зазначити, що деякі наночастинки не давали чітких рефлексів, це може бути зумовлено їх аморфним станом (рис. 1).



А



Б

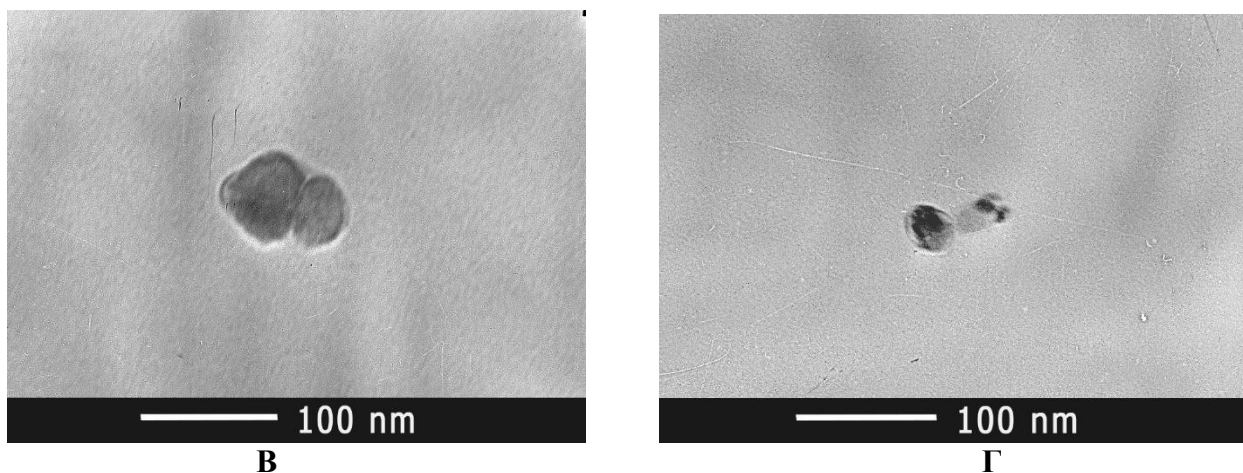


Рис. 1. Електронно-мікроскопічні дослідження зображень наночастинок цинку (А) – (55,4 – 61,2 нм), (Б) – (47 – 95,1 нм) та германію цитрату (В) – (52,2 нм), (Г) – (37,2 нм)

Наночастинки цинку, селену та германію цитратів, отримали від товариства з обмеженою відповідальністю «Наноматеріали і нанотехнології», м. Київ. На першому етапі утворення наночастинок металеві гранули Zn, Se та Ge занурюють у дистильовану воду, де через металеві гранули пропускають імпульс електричного струму з високою амплітудою 100 – 1000 А. У результаті ерозійно-вибухового розряду температура на межі контакту між гранулами збільшується до 10 000 °С, внаслідок чого відбувається подрібнення поверхні гранул та утворення колоїдного розчину наночастинок металів розміром від 1 до 100 нм. Під час електричного імпульсу одночасно з утворенням наночастинок відбувається представлена загальною формулою $[Me\eta(H_2O)_n]^{2n-}$, де Me η – хелатоутворюючий метал наночастинок, H₂O – молекула води, яка лігандами (зв'язуються з металом), n – ціле число, що вказує скільки молекул води, оточує наночастинки металу. Таким чином, другим етапом є формування первинних аквахелатних комплексів: $[Zn(H_2O)_n]^{2-}$, $[Se(H_2O)_n]^{2-}$, $[Ge(H_2O)_n]^{2-}$, де n – число молекул H₂O, в координаційній сфері, заряд 2⁻ утворюється внаслідок надлишку електронів, як захоплюють наночастинки. Після утворення первинних наночастинок на третьому етапі у водний розчин додають лимонну кислоту (C₆H₈O₇), що дисоціює у водному середовищі утворюючи цитрат-аніони (C₆H₅O₇³⁻). Цитрат має три карбоксильні групи, дві з яких приєднуються до атома металу і заміщують молекули води у внутрішній сфері комплексу. Внаслідок цього формуються хелатні комплекси $[Zn(C_6H_5O_7)(H_2O)_m]^{2-}$, $[Se(C_6H_5O_7)(H_2O)_m]^{2-}$, $[Ge(C_6H_5O_7)(H_2O)_m]^{2-}$, де m – число залишкових молекул H₂O, заряд 2⁻ вказує на надлишок електронів у комплексі, і саме цей негативний заряд поверхні притягує молекули води. Завершальним четвертим етапом формування наночастинок є утворення багатошарової нагідратної сполуки, де молекули води, приєднується не до самого комплексу, а до попереднього шару води. У результаті цього молекули води першого шару завдяки позитивному заряду Гідрогену спрямовані до негативно зарядженої поверхні наночастинок і утворюють водневі зв'язки із лігандами, розташованій у внутрішній координаційній сфері. Наступні шари молекули води

нашаровуються завдяки електростатичній дипольній взаємодії. Утворена багатшарова оболонка захищає наночастинки від агломерації та випадання в осад. Такий комплекс на основі наночастинок Zn, Se та Ge виглядає наступним чином: $[\text{Zn}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)(\text{H}_2\text{O})_m]^{2-} \times (\text{H}_2\text{O})_p$, $[\text{Se}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)(\text{H}_2\text{O})_m]^{2-} \times (\text{H}_2\text{O})_p$, $[\text{Ge}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)(\text{H}_2\text{O})_m]^{2-} \times (\text{H}_2\text{O})_p$, де p – число молекул води зовнішніх шарів. Стійкість комплексу наночастинок аквахелату забезпечується кулонівськими силами між багатшаровою наногідратною оболонкою та поверхневим негативним зарядом наночастинок.

Таким чином, полярність молекул води зумовлює тетраедричні структури, що складаються з двох асиметрично розміщених атомів Гідрогену (δ^+) та двох неподільних електронних пар Оксигену (δ^-). Завдяки водневим зв'язкам, які утримують гідратну оболонку, наночастинка має властивість «розкриватися» при взаємодії з рецепторами клітини. Молекули води у внутрішньому шарі можуть легко заміщуватися донорами електронів, які виробляють рецептори на поверхні клітини, що забезпечує ефективну взаємодію наночастинок з клітиною мембраною. Згідно з електрохімічною теорією, трансмембранне перенесення відбувається на межі розподілу фаз, а енергія для перенесення виникає через градієнт електричного потенціалу [[Косінов, М. В., 2008](#)].

ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З ВІТЧИЗНЯНИМИ І ЗАРУБІЖНИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ТА АНАЛОГАМИ

1. Гематологічні параметри організму кролів за випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах помірного теплового стресу

Сучасне ведення промислового кролівництва функціонує в умовах глобальних кліматичних змін з критичним підвищенням температури довкілля. Ці чинники негативно впливають на мікроклімат приміщень для утримання тварин. Кролі є чутливими до температури довкілля через біологічні особливості їхнього організму. Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату у промисловому кролівництві потребує значних капіталовкладень, що є важливим у період літньої пори року, коли відзначаються негативні температурно-вологісні зміни. Негативний вплив теплового стресу на організм кролів, можна пом'якшити введенням компонентів корму, що включають вітаміни, органічні кислоти, ензими, мінеральні речовини тощо [[Liang, Z. L., 2022](#)]. Тому, метою першого етапу досліджень було створити умови помірного теплового стресу та з'ясувати рівень його пом'якшення за введення до раціону кролів I групи – цинку цитрату (12 мг/кг маси тіла); II – селену цитрату (60 мкг/кг маси тіла); III – германію цитрату (12,5 мкг/кг маси тіла) у період з 35 до 78 добового віку.

Результати досліджень температури, вологості та їхнього співвідношення контролювали впродовж дослідження. Так, середня вологість і температура повітря віварію, під час підготовчого періоду за умов помірного теплового стресу становила 59 % і 19,7 °C. Для визначення ТВІ у віварії контролювали

співвідношення температури та вологості кожної доби. Отримане значення ТВІ відповідало 19,0, що свідчить про відсутність теплового стресу впродовж підготовчого періоду експерименту.

Відповідно до мети дослідження, показники середньої температури у приміщенні за 14 діб дослідного періоду становили 28,8 °С та вологості – 85,7 %, ТВІ за період дослідження дорівнював 28,2.

На 29 добу дослідного періоду середні значення вологості та температури відповідно були 86,2 % та 28,7 °С. ТВІ становив 28,1, що згідно з формулою вказує на параметри помірного теплового стресу у завершальному періоді застосування добавок.

Проведені нами дослідження виявили, що випоювання кролям цинку цитрату та селену цитрату у крові відповідно збільшує кількість еритроцитів на 22,2 % ($p<0,01$) та 20,2 % ($p<0,05$) порівняно з контролем на завершальному етапі дослідження, що може свідчити про стимулюючий вплив на процеси еритропоезу (табл. 2). Аналіз одержаних результатів концентрації гемоглобіну у тварин I, II, III групи був відповідно вищим на 16,3 % ($p<0,01$), 28,5 % ($p<0,001$), 21,9 % ($p<0,001$) на 29 добу дослідження. Відсоток гематокритної величини за випоювання добавок цитратів мікроелементів підвищився у крові кролів I і II дослідних груп відповідно на 27,3 %, ($p<0,01$) і 20,7 % ($p<0,05$) на 29 добу експерименту (табл. 2). Отримані дані збільшення концентрації гемоглобіну та відсотка гематокритної величини у крові кролів безпосередньо корелюють з кількістю еритроцитів. Встановлено, що введення розчину $ZnSO_4$ в кількості 2,8 мг Zn/кг маси тіла у концентрації 0,2 мкг до культури клітин кісткового мозку щурів *in vitro*, активує еритропоез [Chen, Y.-H., 2018]. Випоювання поросятam протягом 10 діб наночастинок германію в кількості 0,01 мг/добу підвищує рівень гемоглобіну на 14,3 %, відповідно до показників контрольної групи [Ковальчук, О. О., 2024]. Таким чином, результати нашого дослідження узгоджуються з літературними даними і можуть вказувати, що застосовані дози цинку і селену цитратів опосередковано активують процеси еритропоезу та забезпечують газообмінну функцію в організмі кролів.

Таблиця 2

Кількість еритроцитів, вміст гемоглобіну та гематокриту у крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M\pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Періоди досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальна кількість еритроцитів, $10^{12}/л$	К	5,76 $\pm$ 0,51	5,81 $\pm$ 0,70	5,04 $\pm$ 0,62
	Д – I	6,08 $\pm$ 0,69	5,84 $\pm$ 0,53	6,16 $\pm$ 0,55**
	Д – II	6,28 $\pm$ 0,55	6,02 $\pm$ 0,56	6,06 $\pm$ 0,63*
	Д – III	6,45 $\pm$ 0,42	5,93 $\pm$ 0,69	5,41 $\pm$ 0,26

продовження таблиці 2

Гемоглобін, г/л	К	132,6±5,75	133,0±10,21	109,1±6,11
	Д – І	135,1±8,47	134,5±12,56	127,0±5,25**
	Д – II	149,6±16,57	145,6±13,54	140,3±9,77***
	Д – III	150,0±10,82	134,6±8,01	133,1±5,63***
Гематокрит, л/л	К	0,413±0,07	0,387±0,06	0,362±0,02
	Д – І	0,467±0,06	0,433±0,04	0,461±0,03**
	Д – II	0,449±0,05	0,416±0,07	0,437±0,07*
	Д – III	0,502±0,06	0,467±0,04	0,442±0,01

Примітка: К – контрольна група (гранульований комбікорм і вода); Дослідна – І – цинку цитрат (60 мг/л або 12 мг/кг маси тіла); Дослідна – II – селену цитрат (300 мкг/л або 60 мкг/кг маси тіла); Дослідна – III – германію цитрат (62,5 мкг/л або 12,5 мкг/кг маси тіла). У цій та наступних таблицях статистично вірогідні різниці враховували порівняно з контрольною групою: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$; *** – $P \leq 0,001$.

У крові кролів встановлено підвищення середньої концентрації гемоглобіну в еритроциті за впоювання цинку цитрату на 5,11 % ($p < 0,01$) на 29 добу дослідження та селену цитрату відповідно на 4,42 і 6,19 % ($p < 0,05 - 0,001$) на 14 і 29 доби експерименту (табл. 3). На нашу думку, завдяки антиоксидантним властивостям та важливим функціям у процесах активації ензимів органічні сполуки селену та цинку опосередковано впливають на кількість еритроцитів та еритроцитарні індекси, що є важливим показником кровотворної функції організму за умов помірного теплового стресу.

Таблиця 3

Еритроцитарні індекси у крові кролів за впоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Періоди досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Середній об'єм еритроцита, фл	К	97,43±2,30	98,23±2,31	97,23±3,46
	Д – І	96,31±2,53	101,10±2,74	98,53±2,28
	Д – II	98,00±2,52	102,57±2,57	99,46±2,45
	Д – III	95,03±1,36	100,15±4,38	100,37±3,14
Середній вміст гемоглобіну в еритроциті, пг	К	23,56±1,11	23,53±0,95	23,83±0,84
	Д – І	23,83±0,43	23,90±1,23	24,61±0,90
	Д – II	24,38±0,77	25,03±0,88	24,40±0,94
	Д – III	24,68±0,57	24,71±1,23	25,10±0,15
Середня концентрація гемоглобіну в еритроциті, г/л	К	241,67±2,87	225,83±6,49	231,17±5,98
	Д – І	247,17±3,54	228,17±3,18	243,00±2,96**
	Д – II	243,67±5,27	235,83±3,65*	245,50±3,53***
	Д – III	244,67±1,75	232,17±6,01	234,00±6,35
Ширина розподілу еритроцитів, %	К	10,23±0,42	10,38±0,60	10,43±0,58
	Д – І	10,68±0,36	10,81±0,34	10,98±0,53
	Д – II	10,36 ±0,20	10,46±0,62	10,60±0,43
	Д – III	10,75±0,59	10,96±0,52	10,50±0,63

Лейкоцити є клітинами захисної системи організму і їх рівень був в межах фізіологічних величин [Leineweber, C., 2018], однак кількісне їх зменшення в дослідних групах, може свідчити про відсутність алергічної реакції або знижений ризик виникнення запалення за вipoювання добавок. Дослідженнями встановлено, що у крові кролів I і II дослідних груп зменшилась кількість лейкоцитів відповідно на 9,01 ($p < 0,05$) і 7,95 % ($p < 0,05$) та лімфоцитів 11,3 ($p < 0,05$) і 12,5 % ($p < 0,05$) на завершальному етапі дослідження (табл. 4). У дослідженнях *in vivo* зрізи тканин мишей, оброблених наночастинками цинку оксиду розчином 30 нМ, виявили підвищені рівні хемокіну IP-10, тоді як 30 нМ покриті поліакрилатом натрію, наночастини цинку оксиду викликали збільшення протеїнів сімейства хемінів CCL5 (RANTES), які відіграють ключову роль у захисних процесах організму і перерозподіляють лейкоцити до осередків патологічних процесів [Saptarshi, S. R., 2015]. Знижений рівень лімфоцитів у період дослідження, може вказувати на менший ризик розвитку гострого запалення та зменшує ризик захворювань під впливом цитратів мікроелементів [Nuñez Villota, J., 2011].

Використання добавки цинку цитрату зумовило підвищення вмісту моноцитів у крові кролів на 23,5 % ($p < 0,05$) на 29 добу експерименту (табл. 4). Цинк є важливим мікроелементом, який бере участь у регуляції імунної системи. Підвищений вміст моноцитів, може вказувати на активацію імунної системи, яка відповідає на стресові умови, у тому числі й тепловий стрес. Дослідженнями Yamei Qiao та ін. (2018) встановлено, що інгаляційний вплив наночастинок цинку оксиду в дозах 2, 4 та 8 мг/кг підвищувало утворення інтерлейкін-8 (IL-8), IL-1 β , TNF- α та збільшило кількість моноцитів, стосовно контрольної групи [Qiao, Y., 2018]. Такі результати вказують, на активацію імунної ланки захисту організму кролів в умовах підвищених температур довкілля.

Тому, на нашу думку збільшений вміст моноцитів є результатом імунної відповіді, шляхом вироблення цитокінів, які активують реакцію імунофізіологічної системи за умов помірного теплового стресу.

Таблиця 4

Кількість лейкоцитів у крові кролів за вipoювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальна кількість лейкоцитів, $10^9/\text{л}$	К	$9,58 \pm 0,83$	$9,35 \pm 0,59$	$9,43 \pm 0,41$
	Д – I	$8,66 \pm 0,69$	$8,63 \pm 0,80$	$8,58 \pm 0,44^*$
	Д – II	$8,73 \pm 0,35$	$9,11 \pm 0,59$	$8,68 \pm 0,37^*$
	Д – III	$8,70 \pm 0,31$	$8,96 \pm 0,32$	$9,15 \pm 0,48$

продовження таблиці 4

Загальна кількість лімфоцитів, $10^9/\text{л}$	К	$5,26 \pm 0,63$	$5,16 \pm 0,47$	$5,75 \pm 0,27$
	Д – I	$4,66 \pm 0,58$	$4,88 \pm 0,29$	$5,10 \pm 0,34^*$
	Д – II	$4,41 \pm 0,18$	$4,98 \pm 0,19$	$5,03 \pm 0,33^*$
	Д – III	$4,43 \pm 0,95$	$4,80 \pm 0,40$	$5,23 \pm 0,42$
Загальна кількість моноцитів, $10^9/\text{л}$	К	$1,43 \pm 0,10$	$1,33 \pm 0,12$	$1,06 \pm 0,05$
	Д – I	$1,55 \pm 0,25$	$1,51 \pm 0,11$	$1,31 \pm 0,19^*$
	Д – II	$1,65 \pm 0,24$	$1,50 \pm 0,20$	$1,15 \pm 0,08$
	Д – III	$1,50 \pm 0,20$	$1,55 \pm 0,10$	$1,16 \pm 0,13$
Загальна кількість гранулоцитів, $10^9/\text{л}$	К	$1,81 \pm 0,56$	$2,11 \pm 0,54$	$2,20 \pm 0,14$
	Д – I	$2,38 \pm 0,27$	$2,25 \pm 0,24$	$2,86 \pm 0,57^*$
	Д – II	$1,66 \pm 0,33$	$2,20 \pm 0,33$	$2,68 \pm 0,35$
	Д – III	$1,76 \pm 0,50$	$2,16 \pm 0,54$	$3,66 \pm 0,40^{***}$

Випоювання цитратів мікроелементів позначилось у крові кролів I і III дослідних груп підвищенням абсолютного вмісту гранулоцитів відповідно на 30 ($p < 0,05$) і 66,3 % ($p < 0,001$) на 29 добу експерименту. Додавання до раціону кролів цинку, селену та германію цитратів зумовило вірогідні зміни щодо контрольної групи за відносним вмістом гранулоцитів на 13,5 % ($p < 0,05$), 17,1 % ($p < 0,01$) і 41,1 % ($p < 0,001$) впродовж завершального періоду дослідження (табл. 5). Германій, за даними літератури, має здатність активувати імунну систему, стимулюючи утворення різних типів імунних клітин, включаючи гранулоцити [Cho, J. M., 2020]. Надходження до раціону фізіологічно обґрунтованої кількості органічних сполук цинку і селену активує ензими, які відповідають за синтез дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) та рибонуклеїнової кислоти (РНК), сприяють проліферації та диференціації клітин, включаючи гранулоцити, що є важливою складовою імунної системи у захисті організму від інфекцій [Yildiz, A., 2019]. Тому, отриманий результат підвищеного вмісту гранулоцитів, може вказувати на імунномодулюючий вплив наночастинок цинку та германію цитратів.

Таблиця 5

Форми лейкоцитів у крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Відносний вміст лімфоцитів, %	К	$54,96 \pm 6,14$	$54,87 \pm 4,70$	$57,31 \pm 3,35$
	Д – I	$48,55 \pm 4,68$	$54,00 \pm 1,96$	$55,38 \pm 2,10$
	Д – II	$55,61 \pm 2,62$	$53,91 \pm 2,39$	$56,33 \pm 2,29$
	Д – III	$49,98 \pm 4,56$	$52,80 \pm 2,49$	$54,21 \pm 3,32$
Відносний вміст моноцитів, %	К	$26,83 \pm 5,35$	$22,04 \pm 3,84$	$12,41 \pm 1,29$
	Д – I	$23,56 \pm 6,15$	$22,85 \pm 1,95$	$13,65 \pm 0,71$

продовження таблиці 5

Відносний вміст гранулоцитів, %	Д – II	23,01±2,32	23,86±1,90	12,56±1,14
	Д – III	28,73±3,64	25,46±1,61	12,70±1,39
	К	18,50±4,81	19,38±1,63	25,91±1,47
	Д – I	27,73±6,45	20,78±2,08	29,43±0,89*
	Д – II	21,36±4,43	21,20±4,78	30,35±2,85**
	Д – III	21,25±6,88	20,36±3,40	36,56±2,25***

За випоювання добавки цитратів мікроелементів відзначено тенденцію до збільшення рівня тромбоцитів, середнього об'єму тромбоцитів, тромбокритної величини та відносної ширини розподілу тромбоцитів за об'ємом впродовж 29 діб дослідження. Отримані зміни на рівні тенденції щодо підвищення кількості тромбоцитів за випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах помірного теплового стресу вказує, на можливу адаптаційну чи компенсаторну активацію тромбоцитарної ланки у крові кролів. Таким чином, випоювання кролям цинку та селену цитратів за умов помірного теплового стресу зумовило виражені позитивні зміни гематологічних показників крові кролів впродовж дослідження. Додавання до раціону германію цитрату мало виражений вплив на організм кролів, проте пом'якшувало негативну дію теплового стресу, з вираженими позитивними змінами параметрів крові на 29 добу дослідження порівняно з контролем.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Юзв'як, М., 2023; Yuzviak, M., 2024; Юзв'як, М., 2024; Юзв'як, М., 2024; Юзв'як, М. О., 2024; Юзв'як, М. О., 2024; Юзв'як, М., 2024; Юзв'як, М., 2026; Юзв'як, М. О., 2026].

2. Біохімічні показники крові кролів за випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах помірного теплового стресу

Результати дослідження біохімічних показників крові кролів, характеризують стан метаболізму та функціонування їх організму, свідчать про позитивну динаміку змін за випоювання цинку, селену та германію цитратів у порівнянні з контрольною групою (табл. 6). Випоювання селену цитрату кролям II дослідної групи, зменшує рівень креатиніну на 7,5 і 7,3 % ($p < 0,05$) та сечовини 11,3 і 17,7 % ($p < 0,01$) впродовж дослідного періоду. Випоювання германію цитрату за умов помірного теплового стресу у III дослідній групі зумовило зниження вмісту сечовини на 19,9 ($p < 0,001$) та 20,3 % ($p < 0,01$) на 14 і 29 доби випоювання порівняно з контролем (табл. 6). Отримані результати дослідження з вірогідним зменшенням вмісту креатиніну і сечовини, можуть вказувати на покращення функції нирок та активацію обміну речовин, що більш було вираженим за впливу добавок селену та германію цитратів.

Таблиця 6

Вміст загального протеїну, альбуміну, креатиніну та сечовини у крові кролів за впоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальний протеїн, г/л	К	60,78 $\pm$ 5,60	57,20 $\pm$ 4,54	54,01 $\pm$ 3,29
	Д – І	62,31 $\pm$ 4,55	58,08 $\pm$ 3,36	55,51 $\pm$ 5,24
	Д – II	63,40 $\pm$ 2,11	62,76 $\pm$ 3,09	59,81 $\pm$ 3,15
	Д – III	60,33 $\pm$ 2,73	60,06 $\pm$ 4,59	57,33 $\pm$ 2,56
Альбумін, г/л	К	29,40 $\pm$ 1,64	33,56 $\pm$ 2,09	31,50 $\pm$ 2,28
	Д – І	32,00 $\pm$ 1,52	30,80 $\pm$ 4,21	27,23 $\pm$ 1,61
	Д – II	31,23 $\pm$ 2,20	29,68 $\pm$ 3,53	28,25 $\pm$ 3,42
	Д – III	31,41 $\pm$ 2,96	28,56 $\pm$ 1,98	29,10 $\pm$ 3,98
Креатинін, мкмоль/л	К	115,10 $\pm$ 4,33	118,03 $\pm$ 5,44	117,62 $\pm$ 7,91
	Д – І	112,03 $\pm$ 5,64	111,57 $\pm$ 4,64	115,28 $\pm$ 4,63
	Д – II	108,53 $\pm$ 4,24	109,10 $\pm$ 4,94*	108,95 $\pm$ 3,45*
	Д – III	111,97 $\pm$ 4,30	112,70 $\pm$ 6,06	116,05 $\pm$ 3,93
Сечовина, ммоль/л	К	7,03 $\pm$ 0,61	6,26 $\pm$ 0,38	6,03 $\pm$ 0,63
	Д – І	6,33 $\pm$ 0,36	5,88 $\pm$ 0,31	5,66 $\pm$ 0,61
	Д – II	6,60 $\pm$ 0,63	5,55 $\pm$ 0,35**	4,96 $\pm$ 0,30**
	Д – III	6,23 $\pm$ 0,49	5,01 $\pm$ 0,11***	4,80 $\pm$ 0,33**

Додавання у раціон кролів цинку цитрату та селену цитрату знижує активність АСТ відповідно на 35,0 ($p < 0,001$) та 22,1 % ($p < 0,001$) і на 15,2 ($p < 0,01$) та 13,6 % ($p < 0,01$) на 14 та 29 доби дослідження порівняно з контрольною групою (табл. 7). Вірогідні значення також встановлено у кролів І та II дослідних груп за активності АЛТ, де відзначено зменшення на 16,6 ($p < 0,001$) та 12,4 % ($p < 0,01$) і 10,8 ($p < 0,01$) та 10,5 % ($p < 0,05$) на 14 та 29 доби впоювання добавок. Дослідженнями виявлено, що додавання до раціону кролів наночастинок цинку оксиду у дозах 20, 40, 60 та 80 мг/кг маси тіла знижує активність АСТ та АЛТ [[Abdel-Wareth, A. A. A., 2022](#)]. Зниження рівня активності АСТ та АЛТ були у межах фізіологічних параметрів [[Leineweber, C., 2018](#)], що може вказувати на покращення функціонування печінки, яка за розмірами є найбільшою порівняно з іншими сільськогосподарськими тваринами і в організмі кролів є центральним органом метаболізму, і було більш вираженим за впоювання цинку цитрату та селену цитрату в умовах помірного теплового стресу. Отже, отриманий результат свідчить про покращення функції печінки та нирок у кролів за умов помірного теплового

стресу, що можливо пов'язано з антиоксидантними властивостями органічного цинку цитрату.

Таблиця 7

Рівень активності амінотрансфераз та лужної фосфатази у крові кролів за впоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
АСТ, Од/л	К	24,70 $\pm$ 2,14	31,90 $\pm$ 1,40	29,48 $\pm$ 0,96
	Д – І	22,83 $\pm$ 2,38	20,71 $\pm$ 1,79***	22,96 $\pm$ 1,99***
	Д – II	26,01 $\pm$ 3,93	27,05 $\pm$ 2,30**	25,45 $\pm$ 1,30**
	Д – III	25,53 $\pm$ 3,36	29,96 $\pm$ 3,10	28,85 $\pm$ 2,43
АЛТ, Од/л	К	58,75 $\pm$ 5,80	74,73 $\pm$ 4,52	63,45 $\pm$ 3,67
	Д – І	51,38 $\pm$ 4,90	62,31 $\pm$ 3,83***	55,58 $\pm$ 2,87**
	Д – II	53,00 $\pm$ 4,82	66,63 $\pm$ 2,70**	56,73 $\pm$ 3,99*
	Д – III	56,51 $\pm$ 6,26	70,05 $\pm$ 2,07	60,91 $\pm$ 4,00
Лужна фосфатаза, Од/л	К	277,45 $\pm$ 25,02	324,50 $\pm$ 31,81	293,25 $\pm$ 37,13
	Д – І	309,07 $\pm$ 21,98	316,08 $\pm$ 18,28	278,83 $\pm$ 28,11
	Д – II	303,73 $\pm$ 22,66	315,03 $\pm$ 28,99	273,73 $\pm$ 29,55
	Д – III	308,18 $\pm$ 13,35	310,37 $\pm$ 22,72	268,55 $\pm$ 34,87

Дослідження вмісту холестеролу у крові кролів I і II дослідних груп зумовило його відповідне зменшення на 27,7 ($p<0,01$) і 22,2 % ($p<0,01$) та 20,3 ($p<0,05$) і 16,6 % ($p<0,05$) на 14 та 29 доби експерименту (табл. 8). Холестерол є основним компонентом клітинних мембран і бере участь у формуванні структурної цілісності та проникності клітини. Проведений метаналіз 24 клінічних досліджень на 14515 людях, показав, що додавання цинку знижує рівень холестеролу та ліпопротеїдів низької щільності (ЛПНЩ) [Ranasinghe, P., 2015]. Дослідження на мишах з дефіцитом аполіпопротеїду, яких годували раціоном з високим вмістом холестерину та жирів – 50 мкг Se/кг на добу встановлено зниження холестеролу, ЛПНЩ та рівень судинного ураження після восьми тижнів експерименту [Guo, L., 2020]. Такі зміни можуть свідчити, що додавання до раціону кролів наночастинок цинку та селену цитратів позитивно впливають на ліпідний обмін кролів та захищає серцево-судинну систему тварин.

Впоювання селену цитрату збільшує вміст неорганічного фосфору на 21,3 % ($p<0,05$) на 29 добу дослідження (табл. 8). У експериментах на курах-несучках за додавання цинку, селену, та вітаміну Е виявили вплив на лужні та кислі фосфатази, які беруть участь у перетворенні фосфатних сполук [Ніщепенко, М. П., 2019]. Таким чином, додавання до раціону селену цитрату, регулює фосфатний обмін та активність фосфатаз. Отримані результати біохімічних змін в організмі кролів свідчать про позитивну дію на перебіг

метаболических процессов, залежно від органічної наносполуки мікроелемента та його кількості.

Таблиця 8

Вміст холестеролу, триацилгліцеролів, загального кальцію та неорганічного фосфору в крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Триацилгліцерол, ммоль/л	К	0,63 $\pm$ 0,07	0,79 $\pm$ 0,07	0,71 $\pm$ 0,06
	Д – І	0,69 $\pm$ 0,14	0,67 $\pm$ 0,10	0,62 $\pm$ 0,05
	Д – ІІ	0,78 $\pm$ 0,06	0,76 $\pm$ 0,06	0,66 $\pm$ 0,09
	Д – ІІІ	0,76 $\pm$ 0,06	0,72 $\pm$ 0,09	0,67 $\pm$ 0,05
Холестерол, ммоль/л	К	0,17 $\pm$ 0,02	0,54 $\pm$ 0,07	0,54 $\pm$ 0,06
	Д – І	0,19 $\pm$ 0,03	0,39 $\pm$ 0,03**	0,42 $\pm$ 0,04**
	Д – ІІ	0,20 $\pm$ 0,01	0,43 $\pm$ 0,04*	0,45 $\pm$ 0,02*
	Д – ІІІ	0,21 $\pm$ 0,02	0,52 $\pm$ 0,07	0,48 $\pm$ 0,05
Загальний кальцій, ммоль/л	К	3,06 $\pm$ 0,26	3,06 $\pm$ 0,20	2,83 $\pm$ 0,41
	Д – І	3,26 $\pm$ 0,19	3,10 $\pm$ 0,24	2,86 $\pm$ 0,28
	Д – ІІ	3,35 $\pm$ 0,15	3,13 $\pm$ 0,29	2,98 $\pm$ 0,37
	Д – ІІІ	3,30 $\pm$ 0,14	3,20 $\pm$ 0,23	2,90 $\pm$ 0,25
Неорганічний фосфор ммоль/л	К	1,61 $\pm$ 0,07	1,93 $\pm$ 0,15	1,78 $\pm$ 0,17
	Д – І	2,08 $\pm$ 0,23	1,96 $\pm$ 0,16	1,95 $\pm$ 0,22
	Д – ІІ	2,01 $\pm$ 0,24	2,11 $\pm$ 0,07	2,16 $\pm$ 0,12*
	Д – ІІІ	2,13 $\pm$ 0,24	1,95 $\pm$ 0,23	1,90 $\pm$ 0,24

Отже, на досліджувані зміни біохімічних показників плазми крові кролів у більшій мірі вплинули добавки цинку цитрату та селену цитрату, що характеризувалися на 14 і 29 доби дослідного періоду зменшенням активності АСТ, АЛТ та холестеролу. За випоювання селену цитрату зменшився рівень креатиніну, сечовини впродовж експерименту та збільшився вміст неорганічного фосфору на 29 добу. Додавання германію цитрату зумовило зниження вмісту сечовини відповідно на 14 та 29 добу. Отримані дані, вказують на активацію обміну речовин та позитивний вплив застосованих сполук мікроелементів.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Yuzviak, M., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М., 2024].

3. Дослідження антиоксидантного стану організму кролів за випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах помірного теплового стресу

Оксидативний стрес виникає внаслідок підвищення рівня АФО та спричиняє негативні наслідки для функціонування клітин організму [Afzal, S., 2023; Schieber, M., 2014]. Тому, дослідження антиоксидантного стану організму кролів за вживання наночастинок в умовах теплового стресу, було одним із важливих етапів нашого експерименту. У результаті проведених досліджень встановлено, що вміст гідропероксидів ліпідів (ГПЛ) та ТБК-активних продуктів залежав від застосованої добавки і тривалості їх споживання тваринами. Так, вміст ГПЛ у крові кролів I дослідної групи знижувався на 71,7 і 51,5 % ($p<0,001$) на 14 і 29 добу дослідження, що є позитивним ефектом застосування цинку цитрату на пом'якшення негативної дії високих температур довкілля (табл. 9). Цинк є важливим компонентом понад 300 ензимів і відіграє ключову роль у системі антиоксидантного захисту [Hosny, N. S., 2020].

Менші відчутні зміни у крові кролів отримано у результаті застосування селену цитрату, де вміст ГПЛ знижується на 63,0 % ($p<0,001$), лише на 14 добу застосування добавки, порівняно з контрольною групою (табл. 9). Селен є частиною активного центру ГП, що знижує вміст пероксиду ліпідів та пероксиду гідрогену (H_2O_2), сприяє підвищенню біологічної цінності м'язової тканини промислових тварин і зменшує ризик окисних процесів на рівні клітини [Grossi, S., 2021]. ГПЛ є первинними продуктами пероксидного окиснення, що перетворюються у різні вторинні метаболіти і взаємодіють з протеїнами, ДНК та іншими клітинними компонентами. Аналіз одержаних результатів вмісту ТБК-активних продуктів у плазмі крові тварин вказує на його зниження у всіх дослідних групах на першому етапі дослідження та менш вираженні зміни на 29 добу експерименту. Так, у плазмі крові кролів I, II і III дослідних груп вміст ТБК-активних продуктів був відповідно нижчим на 22,3 % ($p<0,01$), 24,7 % ($p<0,001$) і 19,4 % ($p<0,01$) на 14 добу дослідження порівняно з контролем (табл. 9).

Таблиця 9

Продукти пероксидного окиснення ліпідів у плазмі крові кролів за вживання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M\pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Гідроперокси-ліпідів, Од Е/мл	К	0,68 $\pm$ 0,056	1,38 $\pm$ 0,206	1,59 $\pm$ 0,173
	Д – I	0,82 $\pm$ 0,097	0,39 $\pm$ 0,064***	0,77 $\pm$ 0,060***
	Д – II	0,89 $\pm$ 0,179	0,51 $\pm$ 0,052***	1,38 $\pm$ 0,242
	Д – III	0,87 $\pm$ 0,194	1,20 $\pm$ 0,118	1,43 $\pm$ 0,112
ТБК-активні продукти, нмоль/мл	К	1,55 $\pm$ 0,189	1,70 $\pm$ 0,222	2,01 $\pm$ 0,258
	Д – I	1,34 $\pm$ 0,245	1,32 $\pm$ 0,125**	1,79 $\pm$ 0,129
	Д – II	1,33 $\pm$ 0,177	1,28 $\pm$ 0,097***	1,81 $\pm$ 0,318
	Д – III	1,47 $\pm$ 0,163	1,37 $\pm$ 0,145**	1,76 $\pm$ 0,226

Підтвердженням отриманих змін первинних і вторинних продуктів пероксидного окиснення ліпідів у крові кролів за впливу підвищених температур є активність ензимів антиоксидантного захисту. Так, активність СОД в еритроцитах крові кролів І дослідної групи, зростала на 59,5 % ($p < 0,01$) на 29 добу дослідження, стосовно контролю (табл. 10). Можливо легкодоступний в організмі цинку цитрат, за рахунок біологічних особливостей наносполуки, краще впливав на процеси перебігу системи антиоксидантного захисту в організмі кролів, зокрема активність СОД в умовах підвищених температур, що сприяло отриманому позитивному результату.

За впоювання цинку цитрату у еритроцитах крові кролів встановлено підвищення активності КАТ на 34,7 і 38,1 % ($p < 0,01-0,001$) та селену цитрату на 24,6 і 28,3 % ($p < 0,05$) на 14 і 29 доби дослідження порівняно з контролем (табл. 10). Встановлено, що Селен, взаємопов'язаний з трансдукційним шляхом Nrf2, є регулятором окисно-відновного гомеостазу і ключовим фактором транскрипції, впливає на антиоксидантні та детоксикаційні ензимні гени [Basak, P., 2017]. Дослідженнями інших авторів, відзначено, що додавання селену цитрату до раціону з розрахунку 25 та 50 мг/кг до корму, підвищує середньодобові прирости, активність глутатіону та КАТ, знижує рівень ТБК-активних продуктів у сироватці крові кролів за дії теплового стресу [Sheiha, A. M., 2020]. Додаткове споживання кролями органічного цинку в кількості 0,5 % сухої речовини раціону знижувало вміст ТБК-активних продуктів у плазмі крові [Alissa, E. M., 2004]. Таким чином, впоювання цинку та селену цитратів в умовах помірного теплового стресу підвищувало активність СОД та КАТ, можливо активуючи шлях Nrf2. Ці мікроелементи стимулюють експресію генів, що кодують антиоксидантні ензими, забезпечуючи ефективний захист клітин від окисдативного стресу [Guidi, G. C., 1990; Cortese, M. M., 2008].

Таблиця 10

Показники антиоксидантної системи в еритроцитах крові кролів за впоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Супероксиддис-мутаза, од/мг протеїну	К	7,16 $\pm$ 0,984	6,27 $\pm$ 1,242	5,59 $\pm$ 1,550
	Д – І	7,05 $\pm$ 1,373	7,12 $\pm$ 1,072	8,92 $\pm$ 0,911**
	Д – II	6,83 $\pm$ 1,012	7,76 $\pm$ 1,116	7,48 $\pm$ 1,411
	Д – III	6,97 $\pm$ 1,411	6,96 $\pm$ 1,121	7,15 $\pm$ 1,436
Каталаза, ммоль H ₂ O ₂ /хв $\times$ 1 мг протеїну	К	100,7 $\pm$ 5,39	82,81 $\pm$ 8,12	78,95 $\pm$ 5,73
	Д – І	101,7 $\pm$ 7,94	111,6 $\pm$ 17,28**	109,1 $\pm$ 11,94***
	Д – II	102,3 $\pm$ 5,59	103,2 $\pm$ 9,85*	101,3 $\pm$ 9,61*
	Д – III	102,8 $\pm$ 4,50	97,98 $\pm$ 9,71	89,33 $\pm$ 15,01

За результатами дослідження таблиці 11 встановлено, що впоювання цинку цитрату позначилося вищим вірогідним вмістом ВГ на 44,0 і 62,5 %

($p < 0,01 - 0,001$) та селену цитрату на 66,0 і 43,7 % ($p < 0,001 - 0,01$) на 14 та 29 добу порівняно з контрольною групою тварин.

Цинк впливає на експресію ензиму глутамат-цистеїнової лігази, що бере участь у синтезі ВГ, що безпосередньо впливає на нейтралізацію вільних радикалів [Marreiro, D., 2017], тоді як Селен взаємодіє з ензимами та підсилює антиоксидантну дію. Отримані вірогідні зміни активності ВГ у результаті його застосування, що може свідчити про певні компенсаторні властивості організму кролів у цьому елементі на дію тепла та його потребу за впливу підвищених температур довкілля.

Активність ГП у крові за вживання селену цитрату щодо контрольної групи була вірогідно вищою на 53,1 і 58,2 % ($p < 0,001$) відповідно на 14 та 29 добу дослідження. Підвищена активність ГП, при додаванні селену цитрату до раціону кролів за умов помірного теплового стресу, вказує на ефективне знешкодження вільних радикалів та пероксидів, що впливає на зменшення запальних процесів організму кролів [Huang, J., 2022], що також підтверджено у дослідженнях, де застосували наночастинки селену розміром 20 – 60 нм та Se-метіоніну у кількості 30 і 70 мкг Se/кг у раціоні мишей, що сприяли кращому накопиченню селену в крові, печінці та нирках порівняно до контрольної групи [Zhang, J., 2008].

Таблиця 11

Глутатіонпероксидазна активність еритроцитів крові кролів за вживання сполук цитратів цинку, селену в умовах помірного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Глутатіонредуктаза, мкмоль НАДФН/хв $\times$ мг протеїну	К	2,02 $\pm$ 0,569	1,73 $\pm$ 0,380	1,31 $\pm$ 0,263
	Д – І	2,14 $\pm$ 0,155	2,32 $\pm$ 0,486	1,39 $\pm$ 0,238
	Д – II	2,55 $\pm$ 0,582	1,53 $\pm$ 0,359	1,15 $\pm$ 0,281
	Д – III	2,41 $\pm$ 0,522	1,70 $\pm$ 0,388	1,10 $\pm$ 0,163
Відновлений глутатіон, ммоль/л	К	0,060 $\pm$ 0,011	0,050 $\pm$ 0,010	0,048 $\pm$ 0,006
	Д – І	0,059 $\pm$ 0,007	0,072 $\pm$ 0,015**	0,078 $\pm$ 0,011***
	Д – II	0,060 $\pm$ 0,012	0,083 $\pm$ 0,005***	0,069 $\pm$ 0,008**
	Д – III	0,055 $\pm$ 0,011	0,037 $\pm$ 0,004	0,050 $\pm$ 0,011
Глутатіонпероксидаза, мкмоль глутатіону/хв $\times$ мг протеїну	К	23,60 $\pm$ 5,294	11,88 $\pm$ 1,899	10,98 $\pm$ 1,529
	Д – І	26,33 $\pm$ 2,377	14,84 $\pm$ 2,233	13,46 $\pm$ 1,579
	Д – II	18,82 $\pm$ 1,663	18,20 $\pm$ 1,336***	17,38 $\pm$ 1,805***
	Д – III	20,50 $\pm$ 1,888	13,30 $\pm$ 2,432	12,09 $\pm$ 1,190

Отже, застосування цитратних сполук наночастинок мікроелементів у раціоні кролів після відлучення за умов помірного теплового стресу сприяло підвищенню ефективності функціонування системи антиоксидантного захисту з вираженим впливом цинку цитрату та селену цитрату, що позначилося нижчим

рівнем ГПЛ та ТБК-активних продуктів у плазмі та вищою активністю СОД, КАТ, ГП і вмісту ВГ у еритроцитах крові на 14 та 29 добу дослідження порівняно з контрольною групою. Вплив германію цитрату в дозі 12,5 мкг/кг на організм кролів за умов підвищених температур був менше вираженим у порівнянні з іншими застосованими сполуками наночастинок, за винятком зниження рівня ТБК-активних продуктів у плазмі крові кролів на 14 добу експерименту.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [[Юзьвяк, М. О., 2024](#); [Юзьвяк, М., 2024](#); [Юзьвяк, М. О., 2025](#); [Юзьвяк, М., 2025](#)].

4. Вплив наночастинок цинку, селену та германію цитратів на вміст ліпідів у окремих тканинах організму кролів за умов помірного теплового стресу

Клітинні мембрани є напівпроникними бар'єрами, які охоплюють клітини та їх субклітинні структури, відокремлюючи і захищаючи внутрішнє середовище. Мембрани регулюють транспорт молекул, включаючи сигнальні молекули, між клітинами та органелами. Багато біохімічних процесів відбуваються саме в мембранах, включаючи енергетичні процеси та біосинтез клітинних компонентів [[Cooper, G. M., 2000](#)]. Ліпіди регулюють цілісність клітинної мембрани, є депо енергії та біоактивними молекулами для передачі клітинних сигналів [[Agrawal, I., 2022](#); [Torres, M., 2020](#)]. Якісний склад ліпідів забезпечує проникність мембрани, що у свою чергу, впливає на здатність клітини обмінюватися субстратами, протеїнами і передавати імпульси [[Van Meer, G., 2008](#)].

Дослідженнями встановлено, що вживання кролям германію цитрату підвищує рівень загальних ліпідів за умов помірного стресу на 16,2 % ($p < 0,05$) на 29 добу дослідження (табл. 12) і може свідчити про активне запасання енергетичних ресурсів, які є необхідними за впливу різноманітних стресових явищ на їх організм.

Застосування у раціоні кролів цинку, селену та германію цитратів, знизив рівень естерифікованого холестеролу на 21,1 % ($p < 0,001$), 19,1 % ($p < 0,001$) і 8,4 % ($p < 0,05$) на 14 добу і на 13,5; 14,1 і 23,4 % ($p < 0,001$) на 29 добу дослідження (табл. 12). За умов теплового стресу в організмі кролів зростає фізіологічне навантаження, через зміни в метаболізмі, що можливо активує механізми, які впливають на зниження рівня естерифікованого холестеролу. Це може вказувати на адаптаційні процеси в організмі на стрес, тому використовуються резерви холестеролу. Таким чином, отримані результати вказують на можливу роль наночастинок цинку, селену і германію цитратів на регуляцію рівня холестеролу у кролів за умов теплового стресу.

Відповідно до наших результатів встановлено, що вміст ТАГ знижується за вживання наночастинок селену і германію цитратів на 9,9 і 11,5 % ($p < 0,01$) на 14 добу дослідження за помірного стресу, що можна пояснити активацією ліполізу, спричинену тепловим стресом і впливом застосованих сполук мікроелементів (табл. 12). Отримані вільні жирні кислоти, могли

використовуватися клітинами, як альтернативне джерело енергії в умовах теплового стресу, компенсуючи нестачу глюкози та забезпечуючи енергетичний баланс клітин [Liu, H., 2025].

За умов помірного теплового стресу встановлено, що підвищення рівня моно- і диацилгліцеролів у крові кролів за випоювання наночастинок цинку цитрату на 14 добу дослідження – на 24,4 % ($p<0,001$) і на 29 добу за випоювання цитрату селену – на 26,3 % ($p<0,001$) порівняно з контролем (табл. 12). На нашу думку, підвищення рівня моно- і диацилгліцеролів у кролів за випоювання наночастинок цитрату цинку, може вказувати на запас нейтральних ліпідів та їх перетворення на енергетичні субстрати в умовах теплового стресу. Цей процес є адаптивною відповіддю організму кролів, що забезпечує клітини енергією.

На 14 добу помірного стресу спостерігалось значне зниження вмісту вільного холестеролу за випоювання цинку і селену цитрату на 19,0 і 20,8 % ($p<0,001$) (табл. 12). Результати дослідження вказують на позитивний вплив цитратів цинку та селену на регуляцію рівня вільного холестеролу, що може сприяти оптимізації клітинного метаболізму і зниженню ризику розвитку атеросклерозу.

Фосфоліпіди збільшують біодоступність біологічно активних сполук та впливають на клітинні процеси, зокрема апоптоз та регуляцію мітохондріальної функції [Strawn, L., 2012]. Нашим дослідженням встановлено, що вміст фосфоліпідів підвищувався в умовах помірного теплового стресу за випоювання сполук мікроелементів у всіх дослідних групах на 16,9; 23,3 і 14,2 % ($p<0,001 - 0,01$) на 14 добу та за випоювання наночастинок цинку і германію цитратів на 8,3 і 10,7 % ($p<0,01$) на 29 добу дослідження, що свідчить про збереження клітинних функцій, таких як енергетичний обмін та транспортування молекул через мембрану, які можуть бути порушені при високих температурах.

Таблиця 12

Вміст загальних ліпідів та окремих їх класів у плазмі крові кролів за умов помірного теплового стресу за випоювання сполук цинку, селену і германію цитратів, (%), ($M\pm SD$, $n=6$)

Класи ліпідів	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальні ліпіди, г/л	К	4,62 $\pm$ 0,58	4,67 $\pm$ 0,46	4,69 $\pm$ 0,61
	Д – І	5,08 $\pm$ 0,64	4,32 $\pm$ 0,33	5,01 $\pm$ 0,28
	Д – II	5,52 $\pm$ 0,66	4,87 $\pm$ 0,42	5,13 $\pm$ 0,37
	Д – III	4,90 $\pm$ 0,48	5,14 $\pm$ 0,10	5,45 $\pm$ 0,25*
Естерифікований холестерол	К	23,54 $\pm$ 0,55	22,96 $\pm$ 1,47	22,47 $\pm$ 1,46
	Д – І	24,90 $\pm$ 1,67	18,10 $\pm$ 0,80***	19,42 $\pm$ 1,14***
	Д – II	22,31 $\pm$ 0,96	18,57 $\pm$ 0,39***	19,28 $\pm$ 0,99***
	Д – III	21,61 $\pm$ 1,43	21,02 $\pm$ 1,21*	17,20 $\pm$ 0,45***

продовження таблиці 12

Триацилгліцероли	К	18,01±1,66	17,09±0,94	15,53±0,73
	Д – I	16,04±0,81	16,32±0,61	16,08±0,28
	Д – II	16,69±1,11	15,39±0,57**	15,45±0,31
	Д – III	15,83±1,81	15,11±0,92**	16,43±1,26
Моно- і диацилгліцероли	К	9,04±1,29	9,45±0,66	9,50±0,51
	Д – I	9,29±0,99	11,76±1,18***	10,00±0,84
	Д – II	9,71±0,62	10,45±0,32	12,00±0,79***
	Д – III	10,73±1,22	9,87±0,44	9,96±0,46
Вільний холестерол	К	7,82±0,85	9,45±0,33	7,92±0,40
	Д – I	8,74±0,77	7,65±0,45***	8,17±1,05
	Д – II	7,84±0,78	7,48±0,32***	7,70±0,40
	Д – III	8,83±1,28	8,93±0,67	9,94±0,47
НЕЖК	К	8,85±1,49	9,98±0,68	8,59±1,48
	Д – I	7,68±1,18	9,84±0,71	7,17±0,82
	Д – II	8,53±1,41	9,82±0,83	8,92±0,46
	Д – III	9,35±0,72	9,59±0,43	8,45±0,38
Фосфоліпіди	К	33,30±1,38	31,03±0,79	36,11±2,12
	Д – I	33,16±1,91	36,30±2,94***	39,14±0,64**
	Д – II	34,90±2,17	38,27±0,77***	36,64±1,02
	Д – III	33,62±2,12	35,45±2,11**	39,99±1,07**

Важливою структурою клітини є біологічна мембрана, що виконує низку важливих функцій та залежить від класів фосфоліпідів. Тому наступні наші дослідження були спрямовані на визначення вмісту класів фосфоліпідів, та впливу їх рівень застосованих добавок мікроелементів в умовах помірного теплового стресу. Зокрема, вміст лізофосфатидилхоліну у крові кролів у I, II, III дослідних груп відзначився нижчим рівнем на 19,0; 41,5 та 55,8 % ($p < 0,001$) через 14 діб дослідження порівняно з контролем (табл. 13). На 29 добу експерименту спостерігали зниження на 17,5 і 20,6 % ($p < 0,01 - 0,001$) у групах, які отримували цинк і селен цитрат відповідно, що вказує на позитивний ефект більшого засвоєння в організмі в результаті застосування наночастинок, оскільки допомагає зберегти цілісність мітохондрій і клітинних мембран в організмі кролів (табл. 13).

У нашому дослідженні встановлено, що за умов помірного теплового стресу в кролів вживання цинку цитрату знижує рівень сфінгомеліну на 26,0 % ($p < 0,001$) на 14 добу і у I, II, III дослідних групах на 35,4; 17,9 та 30,5 % ($p < 0,01 - 0,001$) на 29 добу дослідження (табл. 13), що вказує на позитивні зміни у забезпеченні стабільності та цілісності клітинних мембран, в умовах теплового стресу. Сфінголіпіди утворюються у результаті приєднання сфінгозину до жирних кислот з утворенням амідного зв'язку, що призводить до формування керамідів, які взаємодіючи з фосфорилхоліном, утворюють сфінгомелін або піддаються глікозилюванню з утворенням глікосфінголіпідів [Carreira, A. C., 2015; Marquês, J. T., 2018] і забезпечує структурну стабільність

клітини. Отримані зміни за вживання наночастинок цинку, селену та германію цитратів впливають на активацію ензимів, що гідролізують сфінгомієлін в керамід. Це, може активувати захисні сигнальні шляхи, які пов'язані з транскрипційним фактором Nrf2 і впливають на антиоксидантні та адаптивні механізми організму кролів, що знижує запальні процеси в їхньому організмі.

Встановлено, що вживання цинку, селену та германію цитратів підвищує рівень фосфатидилінозиту в крові кролів на 25,7; 39,9 та 41,2 % ($p < 0,01 - 0,001$) на 14 добу дослідження (табл. 13). Збільшення його рівня після вживання цитратів наночастинок, може бути результатом сигнальної активності через холінергічні агоністи [[Lapetina, E. G., 1981](#)], що стимулюють клітинні відповіді на стрес, впливаючи на адаптацію до підвищеної температури. Таким чином, збільшення рівня фосфатидилінозиту в дослідних групах, може вказувати на активацію специфічних метаболічних шляхів, спрямованих на забезпечення клітинної стабільності і адаптацію до стресових умов, що підтверджується результатами нашого дослідження.

Додавання до раціону кролів наночастинок цинку цитрату, збільшив рівень фосфатидилхоліну на завершальному етапі дослідження на 10,9 % ($p < 0,05$). У нашому дослідженні за вживання наночастинок селену та германію збільшився рівень фосфатидилхоліну в крові кролів на 30,0 і 32,7 % ($p < 0,001$) на 14 добу дослідження і на 29 добу дослідження 45,3 і 42,8 % ($p < 0,001$) (табл. 13). Отримані зміни, можливо свідчать про активацію процесів біосинтезу фосфатидилхоліну в печінці, що забезпечує стабільність клітинної мембрани та функціональність ліпопротеїдів. Зокрема, у наукових дослідженнях на гепатоцитах щурів, культивованих у середовищі з дефіцитом метіоніну або холіну, обмежене надходження цих субстратів інгібувало шляхи біосинтезу фосфатидилхоліну, порушувало секрецію аполіпопротеїдом «В» та ліпідів, пов'язаних із обміном ЛПНЩ [[Kulinski, A., 2004](#)]. Тому, вживання наночастинок селену та германію цитратів, можливо опосередковано впливає на синтез фосфатидилхоліну, що забезпечує фізіологічну функціональність клітинних мембран до підвищених температур довкілля.

Нашими дослідженнями встановлено, що вживання наночастинок цинку у кролів за помірного теплового стресу на 14 добу, підвищує рівень фосфатидилетаноламіну на 25,2 % ($p < 0,05$), що можливо стимулює процеси аутофагії, та сприяє збереженню клітинного гомеостазу та стабільність мембран під час температурного стресу, впливає на клітинну адаптацію та метаболічні процеси у клітинах кролів. Встановлено збільшення фосфатидної кислоти у клітинах, на 14 добу експерименту в групах за помірного стресу, що отримували наночастинок цинку, селену та германію цитратів на 33,8; 24,4 і 26,5 % ($p < 0,01 - 0,001$), що може вказувати на активацію адаптаційних механізмів клітин, спрямованих на стабілізацію мембран і підтримку їх функціональності під час теплового стресу, сприяє регуляції мембранного злиття та везикулярного транспорту, необхідного для ефективного обміну між органами й збереження клітинного гомеостазу (табл. 13).

Таблиця 13

Вміст класів фосфоліпідів у плазмі крові кролів за умов помірного теплового стресу за впоювання сполук цинку, селену і германію цитратів, (%), ($M \pm SD$, $n=6$)

Класи фосфоліпідів	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Лізофосфатидилхолін	К	23,44 $\pm$ 2,41	26,93 $\pm$ 2,38	18,62 $\pm$ 1,36
	Д – І	23,84 $\pm$ 2,73	21,80 $\pm$ 1,35***	15,36 $\pm$ 1,04**
	Д – II	22,00 $\pm$ 3,46	15,74 $\pm$ 2,46***	14,77 $\pm$ 1,75***
	Д – III	20,62 $\pm$ 1,73	11,89 $\pm$ 0,68***	17,51 $\pm$ 1,17
Сфінгомієлін	К	10,58 $\pm$ 1,15	10,34 $\pm$ 0,54	9,59 $\pm$ 0,70
	Д – І	9,63 $\pm$ 1,49	7,65 $\pm$ 0,63***	6,19 $\pm$ 0,86***
	Д – II	9,14 $\pm$ 0,61	9,60 $\pm$ 1,57	7,87 $\pm$ 0,51**
	Д – III	9,14 $\pm$ 1,00	9,44 $\pm$ 0,52	6,66 $\pm$ 0,43***
Фосфатидилінозитол	К	10,67 $\pm$ 1,42	9,39 $\pm$ 1,13	14,10 $\pm$ 1,15
	Д – І	10,30 $\pm$ 0,91	11,81 $\pm$ 1,11**	15,53 $\pm$ 1,76
	Д – II	12,16 $\pm$ 1,97	13,14 $\pm$ 1,44***	12,63 $\pm$ 2,09
	Д – III	11,49 $\pm$ 0,72	13,26 $\pm$ 0,83**	12,10 $\pm$ 2,59
Фосфатидилсерин	К	8,83 $\pm$ 0,43	8,25 $\pm$ 1,68	7,71 $\pm$ 1,29
	Д – І	8,76 $\pm$ 0,75	8,45 $\pm$ 0,82	6,92 $\pm$ 1,73
	Д – II	8,21 $\pm$ 0,99	6,67 $\pm$ 1,33	6,98 $\pm$ 0,63
	Д – III	8,62 $\pm$ 0,94	7,26 $\pm$ 0,70	5,83 $\pm$ 0,87
Фосфатидилхолін	К	28,40 $\pm$ 1,28	27,72 $\pm$ 2,85	28,04 $\pm$ 0,68
	Д – І	27,71 $\pm$ 2,68	27,88 $\pm$ 2,19	31,10 $\pm$ 0,75*
	Д – II	29,10 $\pm$ 2,59	36,27 $\pm$ 0,99***	40,76 $\pm$ 2,04***
	Д – III	27,79 $\pm$ 4,49	37,00 $\pm$ 2,21***	40,06 $\pm$ 1,98***
Фосфатидилетаноламін	К	10,09 $\pm$ 1,78	9,51 $\pm$ 1,35	13,23 $\pm$ 1,35
	Д – І	11,05 $\pm$ 0,93	11,91 $\pm$ 1,39*	14,25 $\pm$ 1,07
	Д – II	9,93 $\pm$ 0,76	8,82 $\pm$ 0,58	11,52 $\pm$ 1,19
	Д – III	11,86 $\pm$ 1,85	11,17 $\pm$ 1,90	12,97 $\pm$ 1,23
Фосфатидна кислота	К	7,97 $\pm$ 1,21	7,82 $\pm$ 0,64	8,68 $\pm$ 1,18
	Д – І	8,69 $\pm$ 0,54	10,47 $\pm$ 0,82***	10,63 $\pm$ 2,27
	Д – II	9,43 $\pm$ 0,86	9,73 $\pm$ 0,36**	6,95 $\pm$ 0,93
	Д – III	8,48 $\pm$ 0,89	9,90 $\pm$ 0,93***	7,18 $\pm$ 0,75

Отже, дослідженнями встановлено, що дія наночастинок цинку, селену і германію цитратів за умов помірного теплового стресу є ефективною та позитивно впливає на ліпідний та фосфоліпідний склад забезпечуючи структурну й функціональну цілісність мембран.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Юзв'як, М. О., 2025; Юзв'як, М. О., 2025; Yuzviak, M., 2026].

5. Гематологічні та клінічні показники організму кролів за впоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах сильного теплового стресу

Наступним етапом нашого експерименту було з'ясувати вплив сполук цинку, селену та германію цитратів на показники їхнього організму за умов сильного теплового стресу. Сполуки мікроелементів та вік кролів були такі ж самі, як у першому етапі дослідження.

Результати дослідження ТВІ середньої вологості та температури у підготовчому періоді за умов сильного теплового стресу становили 81,6 % і 19,8 °C, ТВІ дорівнював 19,4. Показник середньої температури в приміщенні за 14 діб дослідного періоду становив 29,9 °C, вологості 85,6 %. ТВІ за вказаний період експерименту дорівнював 29,2 °C, свідчить про сильний тепловий стрес. Результати обрахунку середніх значень вологості та температури, відповідно становили 84,3 % та 29,9 °C. ТВІ за вказаною формулою відповідав 29,1, що вказує на параметри сильного теплового стресу в завершальний період дослідження.

Отримані показники ТВІ впродовж підготовчого та дослідного періоду помірного та сильного теплового стресу відповідали меті дослідження, що свідчить про відсутність теплового стресу під час підготовчого етапу та його наявності за 29 діб експерименту.

Аналіз одержаних результатів абсолютного вмісту еритроцитів показує, що у крові кролів I та II дослідних груп їх кількість була відповідно вищою на 16,4 % ($p < 0,05$) і 13,6 % ($p < 0,05$) та 19,9 % ($p < 0,01$) і 14,5 % ($p < 0,05$) на 14 і 29 добу дослідження порівняно з контрольною групою (табл. 14). У крові тварин III дослідної групи, яким застосовували германію цитрат у кількості 12,5 мкг Ge/кг маси тіла абсолютний вміст еритроцитів був вірогідно вищим на 15,3 % ($p < 0,05$), стосовно контрольної групи лише на 14 добу експерименту, що може свідчити про виражену дію органічних мікроелементів на організм кролів упродовж тривалішого періоду.

Отримані нами результати дослідження узгоджуються з експериментами Sharaf та ін. (2021), де було встановлено, що вітамін E та органічний селен позитивно вплинули на показники крові, масу тіла кролів та підвищило споживання корму й води у їхньому раціоні [[Sharaf, A. K., 2021](#)].

Відомо, що в умовах підвищених температур організм кролів потребує більшої кількості Оксигену за рахунок інтенсивнішого обміну речовин [[Farghly, M. F. A., 2022](#)]. Нашими дослідженнями встановлено позитивний вплив застосованих цитратів мікроелементів на вміст гемоглобіну, який був більше виражений на першому етапі дослідження у всіх дослідних групах, ніж у другому. Так, у крові кролів I, II та III груп вміст гемоглобіну був вищим відповідно на 20,8; 21,6 і 19,5 % ($p < 0,001$) на 14 добу дослідження порівняно з контролем. На 29 добу дослідження при застосуванні мікроелементів у крові тварин I, II та III дослідних груп відзначено підвищення рівня гемоглобіну на 11,1 ($p < 0,01$), 12,5 ($p < 0,01$) та 9,7 % ($p < 0,05$) відповідно. Слід зазначити, що дія германію цитрату відзначалася дещо нижчими рівнями досліджуваного

показника. Це на нашу думку, може залежати від спожитої кількості, наномікроелементів, які мають високу каталітичну активність, але їх доступність в організмі залежить від дози у раціоні.

У крові кролів I та II груп відзначено достовірні зміни показників гематокриту відповідно на 24,1 та 15,7 % ($p<0,01$) і 21,1 та 16,5 % ($p<0,01$) впродовж дослідження (табл. 14). Менш виражений вплив на вміст формених елементів у загальному об'ємі крові спостерігався при додаванні германію цитрату, який у крові кролів відзначався вірогідним підвищенням на 18,6 % ($p<0,05$) на першому етапі дослідження порівняно з контрольною групою. Встановлено, що органічна сполука германію, відома як Ge-132, може сприяти експресії клітинного стимулюючого фактора IL3 у багатофункціональних гемопоетичних стовбурових клітинах і брати участь у регуляції диференціювання та проліферації багатофункціональних гемопоетичних стовбурових клітин, регулюючи кровотворну функцію в організмі [Kong, T., 2007]. Таким чином, досліджувані цитрати мікроелементів, можуть стимулювати процес еритропоезу, що призводить до збільшення кількості еритроцитів у крові кролів.

Таблиця 14

Кількість еритроцитів, вміст гемоглобіну та гематокриту у крові кролів за вживання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, ($M\pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень,		
		Підготовчи й	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальна кількість еритроцитів, $10^{12}/л$	К	5,81 $\pm$ 0,48	5,52 $\pm$ 0,45	5,58 $\pm$ 0,32
	Д – I	5,82 $\pm$ 0,61	6,43 $\pm$ 0,44*	6,34 $\pm$ 0,33*
	Д – II	6,14 $\pm$ 0,69	6,62 $\pm$ 0,46**	6,39 $\pm$ 0,68*
	Д – III	5,79 $\pm$ 0,32	6,37 $\pm$ 0,47*	6,21 $\pm$ 0,21
Гемоглобін, г/л	К	141,1 $\pm$ 10,62	117,6 $\pm$ 3,32	131,8 $\pm$ 8,10
	Д – I	138,3 $\pm$ 11,11	142,1 $\pm$ 4,75***	146,5 $\pm$ 4,92**
	Д – II	138,8 $\pm$ 5,15	143,1 $\pm$ 4,75***	148,3 $\pm$ 6,21**
	Д – III	135,3 $\pm$ 5,71	140,6 $\pm$ 3,93***	144,6 $\pm$ 5,46*
Гематокрит, л/л	К	0,390 $\pm$ 0,03	0,402 $\pm$ 0,02	0,418 $\pm$ 0,04
	Д – I	0,346 $\pm$ 0,03	0,499 $\pm$ 0,03**	0,484 $\pm$ 0,02**
	Д – II	0,370 $\pm$ 0,04	0,487 $\pm$ 0,04**	0,487 $\pm$ 0,02**
	Д – III	0,406 $\pm$ 0,05	0,477 $\pm$ 0,03*	0,460 $\pm$ 0,03

Додавання до раціону кролів цитратів мікроелементів Zn, Se і Ge у крові тварин I, II і III дослідних груп відзначилося підвищенням середнього вмісту гемоглобіну в одному еритроциті на 10,5; 9,0, 10,4 % ($p<0,01$) на 14 добу та на 29 добу дослідження на 6,4; 9,8 і 7,2 % ($p<0,05 - 0,01$), що можливо вказує на активацію проліферації та диференціації еритроїдних клітин, покращення насиченості Оксигеном організму в умовах стресу та активацію гемопоєзу (табл. 15). Інші досліджувані показники еритроцитарних індексів були у межах

фізіологічних величин, проте їхні різниці були не вірогідними і є на рівні тенденції, що може вказувати на перебіг позитивних змін в їхньому організмі.

Таблиця 15

Еритроцитарні індекси у крові кролів за вipoювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Середній об'єм еритроцита, фл	К	94,80±3,95	93,26±3,28	96,46±4,06
	Д – I	93,71±2,79	94,16±4,03	97,25±3,57
	Д – II	93,08±3,11	94,28±2,71	97,58±1,16
	Д – III	96,16±3,62	94,50±2,94	98,68±1,67
Середній вміст гемоглобіну в еритроциті, пг	К	23,30±1,67	24,28±0,82	23,61±0,53
	Д – I	23,55±0,75	26,83±0,55**	25,13±0,94*
	Д – II	23,60±0,98	26,48±1,40**	25,93±1,07**
	Д – III	23,30±1,18	26,81±0,84**	25,33±1,08*
Середня концентрація гемоглобіну в еритроциті, г/л	К	253,16±6,30	257,50±5,16	246,17±7,27
	Д – I	250,83±3,43	258,17±5,30	253,17±4,07
	Д – II	253,33±6,62	258,00±4,60	252,17±6,79
	Д – III	243,00±7,09	258,50±3,20	250,67±2,33
Ширина розподілу еритроцитів, %	К	9,43±0,46	11,08±0,97	10,55±0,57
	Д–1	9,81±0,31	11,36±0,50	10,63±0,66
	Д–2	9,68±0,36	11,68±0,41	11,30±0,83
	Д–3	9,63±0,32	11,21±0,57	10,71±0,56

Аналіз отриманих результатів кількості лейкоцитів, свідчить про вірогідне зниження їх кількості в крові кролів I та II груп відповідно на 13,1 і 8,3 % ($p<0,05$) та 11,2 % ($p<0,05$) і 10,4 % ($p<0,01$) на 14 і 29 добу дослідження порівняно з контролем. Кролі III дослідної групи відзначилися зменшенням кількості лейкоцитів впродовж дослідження на 11,4 та 9,3 % ($p<0,05$) стосовно контролю (табл. 16). Зниження їхньої кількості може бути позитивним чинником реакції організму кролів та опосередкований імунномодулюючий ефект застосування добавок у їх раціоні.

Встановлено, що тепловий стрес викликає суттєве зменшення відсотка лімфоцитів за рахунок збільшення кількості нейтрофілів [Dhabhar, F. S., 1995]. Аналіз літературних джерел вказує, що вipoювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів зменшують стресовий вплив підвищених температур на імунну систему, знижуючи рівень лімфоцитів. Абсолютний вміст лімфоцитів у крові кролів I, II і III дослідних груп вірогідно зменшувався, щодо контрольної групи на 25,9; 27,3 і 29,0 % ($p<0,05$) на 14 добу дослідження порівняно з контролем. Вірогідне зменшення лімфоцитів також спостерігається на 29 добу дослідження у крові кролів I, II і III дослідних груп, а саме на 20,4 і 21,7 ($p<0,05$) і 16,0 % ($p<0,05$) відповідно до контрольної групи (табл. 16). Отримані зміни, можуть свідчити про імунномодулюючу дію наночастинок

цинку та селену щодо зменшення алергічної реакції організму за умов сильного теплового стресу.

Абсолютний вміст моноцитів вірогідно збільшився у крові кролів І і ІІ дослідних груп на 14,8 та 17,0 % ($p<0,01$) на 14 добу і на 21,3 ($p<0,01$) та 18,3 % ($p<0,05$) на 29 добу стосовно контролю (табл. 16). Встановлено, що додавання цинку до культури клітин людських моноцитів (THP-1) при тепловому стресі 42 °C збільшує експресію протеїнів теплового стресу (HSP70), виконує

Отримані дані вказують на те, що наночастинки цинку та селену цитратів здійснювали позитивний синергетичний вплив для проліферації моноцитів в умовах теплового стресу інгібуючи, запальні сигнальні шляхи.

Таблиця 16

Кількість лейкоцитів та їхніх форм у крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, ($M\pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальна кількість лейкоцитів, $10^9/\text{л}$	К	9,16 $\pm$ 0,52	8,73 $\pm$ 0,84	8,78 $\pm$ 0,49
	Д – І	9,11 $\pm$ 0,65	7,58 $\pm$ 0,44*	8,05 $\pm$ 0,40*
	Д – ІІ	8,55 $\pm$ 0,54	7,75 $\pm$ 0,53*	7,86 $\pm$ 0,38**
	Д – ІІІ	8,46 $\pm$ 0,30	7,73 $\pm$ 0,49*	7,96 $\pm$ 0,41*
Загальна кількість лімфоцитів, $10^9/\text{л}$	К	3,60 $\pm$ 0,47	4,86 $\pm$ 0,64	4,60 $\pm$ 0,37
	Д – І	3,51 $\pm$ 0,53	3,60 $\pm$ 0,46*	3,66 $\pm$ 0,55**
	Д – ІІ	3,33 $\pm$ 0,44	3,53 $\pm$ 0,80*	3,60 $\pm$ 0,50**
	Д – ІІІ	3,53 $\pm$ 0,48	3,45 $\pm$ 0,82*	3,86 $\pm$ 0,28*
Загальна кількість моноцитів, $10^9/\text{л}$	К	1,26 $\pm$ 0,10	1,35 $\pm$ 0,13	1,36 $\pm$ 0,18
	Д – І	1,36 $\pm$ 0,16	1,55 $\pm$ 0,10*	1,65 $\pm$ 0,10**
	Д – ІІ	1,35 $\pm$ 0,21	1,58 $\pm$ 0,07*	1,61 $\pm$ 0,07*
	Д – ІІІ	1,45 $\pm$ 0,15	1,50 $\pm$ 0,15	1,53 $\pm$ 0,10
Загальна кількість гранулоцитів, $10^9/\text{л}$	К	3,63 $\pm$ 0,68	3,58 $\pm$ 0,71	3,38 $\pm$ 0,82
	Д – І	2,43 $\pm$ 0,64	3,83 $\pm$ 1,26	3,56 $\pm$ 0,47
	Д – ІІ	2,96 $\pm$ 1,31	2,68 $\pm$ 0,94	3,38 $\pm$ 0,50
	Д – ІІІ	2,60 $\pm$ 0,79	3,35 $\pm$ 1,02	3,71 $\pm$ 0,93

Вірогідних змін щодо вмісту лейкоцитарних індексів у крові кролів за умов сильного теплового стресу при випоюванні наночастинок цинку, селену і германію цитратів не було, що можливо пов'язано з компенсаторними механізмами організму кролів та регуляторним впливом наночастинок застосованих мікроелементів.

Нашим дослідженням встановлено вірогідне зменшення кількості тромбоцитів у ІІ дослідній групі на 29,5 % ($p<0,05$) на завершальному етапі дослідження (табл. 17). У крові тварин ІІ дослідної групи спостерігалось збільшення середнього об'єму тромбоцитів на 11,6 % ($p<0,05$) на 14 добу і на

14,6 % ($p < 0,05$) на 29 добу випоювання добавки порівняно з контролем (табл. 17).

Таблиця 17

Кількість тромбоцитів та їхні індекси у крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, ($M \pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальна кількість тромбоцитів, $10^9/\text{л}$	К	415,1 $\pm$ 81,96	309,1 $\pm$ 63,68	466,5 $\pm$ 63,50
	Д – І	408,5 $\pm$ 57,47	338,0 $\pm$ 99,17	439,5 $\pm$ 73,27
	Д – II	385,8 $\pm$ 101,23	389,6 $\pm$ 69,24	328,8 $\pm$ 82,42*
	Д – III	460,3 $\pm$ 82,29	329,3 $\pm$ 51,30	445,5 $\pm$ 53,22
Середній об'єм тромбоцита, фл	К	5,03 $\pm$ 0,40	4,98 $\pm$ 0,25	4,93 $\pm$ 0,34
	Д – І	5,10 $\pm$ 0,33	5,28 $\pm$ 0,33	5,00 $\pm$ 0,35
	Д – II	5,50 $\pm$ 0,45	5,56 $\pm$ 0,40*	5,65 $\pm$ 0,22*
	Д – III	5,68 $\pm$ 0,40	5,55 $\pm$ 0,40	5,48 $\pm$ 0,57
Тромбоцит, %	К	0,208 $\pm$ 0,03	0,152 $\pm$ 0,02	0,230 $\pm$ 0,03
	Д – І	0,215 $\pm$ 0,03	0,177 $\pm$ 0,04	0,184 $\pm$ 0,05
	Д – II	0,209 $\pm$ 0,04	0,233 $\pm$ 0,05	0,184 $\pm$ 0,09
	Д – III	0,231 $\pm$ 0,07	0,221 $\pm$ 0,09	0,261 $\pm$ 0,03
Ширина розподілу тромбоцитів по об'єму, %	К	13,50 $\pm$ 1,16	13,45 $\pm$ 1,13	13,16 $\pm$ 0,91
	Д – І	13,88 $\pm$ 1,10	13,96 $\pm$ 1,50	13,35 $\pm$ 0,86
	Д – II	14,76 $\pm$ 1,64	14,88 $\pm$ 1,61	14,33 $\pm$ 1,23
	Д – III	14,68 $\pm$ 0,79	13,98 $\pm$ 1,01	13,93 $\pm$ 1,57

Таким чином, отримані результати зміни вмісту еритроцитів, лейкоцитів і тромбоцитів свідчать про зміни їх кількості в умовах сильного теплового стресу. Використані в дослідженні добавки, більшою мірою цитрат цинку та цитрат селену, меншою – цитрат германію, впливають на пом'якшення негативного впливу підвищених температур довкілля на організм кролів.

Дослідженнями встановлено, що випоювання кролям наночастинок цинку та селену цитратів підвищило частоту дихання на 11,5 % ($p < 0,05$) та 16,4 % ($p < 0,01$) на 29 добу дослідження (табл. 18). Підвищення метаболічної активності, за умов сильного теплового стресу, зумовило зростання потреби в додатковому надходженні Оксигену для забезпечення енергетичних процесів організму, що на наш погляд сприяло підвищенню частоти дихання, оскільки організм намагався компенсувати потребу тканин і органів у додатковій кількості Оксигену для забезпечення обмінних процесів.

Аналіз одержаних результатів показав, що на 14 добу експерименту за випоювання цинку цитрату, відзначається найбільше зниження рівня ректальної температури на 0,8 °С, що підтверджує ефективність Цинку у терморегуляторних процесах організму кролів.

Дослідженнями Носпу та ін. (2020) встановлено, що додавання 0,3 мг органічного Se/кг знижує ректальну температуру на 0,5 °С, що узгоджується з отриманими нами результатами [[Hosny, N. S., 2020](#)]. Отже, додавання наночастинок цинку цитрату більше виражено порівняно з іншими застосованими органічними мікроелементами, впливає на терморегуляторні процеси організму кролів за умов сильного теплового стресу.

Дослідженнями Файєз та ін. (1994) встановлено, що ректальна температура у кролів може досягати 39,5 °С, а частота пульсу та частота дихання можуть бути 168 і 235 ударів на хвилину, що підтверджує взаємозв'язок між температурними змінами навколишнього середовища і фізіологічними показниками тварин [[Fayez, I., 1994](#)].

За випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів спостерігали тенденцію до збільшення частоти серцевих скорочень та збільшення температури вуха, що свідчить про активацію компенсаторних функцій організму, спрямованих на забезпечення терморегуляційних механізмів організму кролів і сприяє стабільності температури тіла в умовах сильного теплового стресу.

Таблиця 18

Клінічні показники організму кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, (M ± SD, n=6)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Дихання, раз/хв.	К	139,17±4,40	142,67±18,53	141,66±7,52
	Д – І	145,33±14,06	144,66±19,82	158,00±12,58*
	Д – II	133,16±12,23	151,33±22,25	165,00±9,44**
	Д – III	140,33±17,68	160,66±13,00	155,83±4,62
Ректальна температура, °С	К	39,20±0,45	40,01±0,58	40,15±0,18
	Д – І	39,33±0,88	39,21±0,38	39,85±0,43
	Д – II	39,51±0,60	39,55±0,50	40,00±0,35
	Д – III	39,63±0,30	39,61±0,63	39,93±0,15
Температура вуха, °С	К	35,65±0,28	36,56±0,57	37,43±0,79
	Д – І	36,61±1,17	36,66±0,59	38,15±0,42
	Д – II	35,85±0,84	36,66±0,54	37,90±0,49
	Д – III	34,51±1,41	37,01±0,60	38,10±0,25
	К	109,33±19,16	96,00±8,39	153,00±10,48
	Д – І	124,66±21,67	99,33±9,26	151,00±12,82
	Д – II	131,66±21,25	113,33±15,10	153,00±11,08
	Д – III	130,00±16,97	112,66±13,44	156,66±5,75

Отже, випоювання наночастинок цинку цитрату та селену цитратів за умов сильного теплового стресу сприяло підвищенню частоти дихання на 11,5 і 16,4 % на 29 добу дослідження. Найбільше зниження ректальної температури на 0,8 °С, було зафіксовано на 14 добу експерименту за випоювання цинку

цитрату. Водночас не виявлено вірогідних результатів впливу германію цитрату на організм кролів, спостерігали лише тенденцію до підвищення частоти дихання, частоти серцевих скорочень, температури вуха і зниженням ректальної температури, що можливо пов'язано з компенсаторними механізмами за умов сильного теплового стресу.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Yuzviak, M., 2024; Юзвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М., 2024; Юзьвяк, М., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М., 2025; Юзвяк, М., 2026].

6. Біохімічні показники крові кролів за впливу наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах сильного теплового стресу

Дослідження біохімічних показників крові кролів, характеризують активність метаболізму та фізіологічний стан організму, показало позитивну динаміку за випоювання цинку цитрату, селену та германію цитрату. Вплив теплового стресу збільшує в'язкість крові через надмірну втрату води, яка виникає внаслідок гіпервентиляції та втрати рідини через сечовипускання, спричиняючи дегідратацію [Buono M. J., 2016]. Альбумін синтезуючись у печінці потрапляє в плазму, забезпечує обмін рідини між кров'ю та міжклітинним простором і виконує функцію транспортного протеїну крові [Moman R. N., 2022]. Випоювання селену цитрату кролям у їх крові підвищило вміст альбуміну на 14,6 % ($p < 0,05$) на 29 добу експерименту (табл. 19). Дослідження Ель-Ратель та ін. (2025) встановлено, що додавання до раціону кролів наночастинок селену з хрому підвищує рівень альбуміну в плазмі крові кролів [El-Ratel, I. T., 2025]. Таким чином, високий рівень альбуміну сприяє нормальній густині крові, що забезпечує фізіологічні процеси кровообігу, газообміну й живлення тканин.

Застосування добавок цитратів мікроелементів у крові тварин I і II дослідних груп відзначилося нижчим рівнем креатиніну, на 7,5 і 7,4 % ($p < 0,05$) порівняно з контролем на завершальному періоді дослідження (табл. 19). Дослідженнями Башара та ін. (2022) встановлено покращення функціонування нирок та зниження концентрації сечової кислоти та креатиніну за додавання до раціону кролів наночастинок селену цитрату [Bashar, A. M., 2022]. На нашу думку, нижчий рівень креатиніну за випоювання цинку цитрату і селену цитрату в умовах теплового стресу, свідчить про покращення функціонування нирок та системи виділення організму кролів, що характеризується підвищеним вмістом кальцію та мінералів у сечі. Отже, отримані зміни узгоджуються з літературними даними, які також встановлені у нашому експерименті та вказують на покращення функціонування нирок за випоювання наночастинок цинку та селену цитратів в період підвищених температур.

Таблиця 19

Вміст окремих біохімічних показників у крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, (M±SD, n=6)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальний протеїн, г/л	К	54,86±2,40	57,20±6,19	55,66±3,54
	Д – І	55,10±3,87	55,55±2,17	52,88±1,10
	Д – II	58,78±4,66	57,86±5,11	60,53±4,23
	Д – III	57,00±2,19	58,33±3,86	58,03±1,70
Альбумін, г/л	К	37,03±4,39	45,81±8,43	39,16±2,51
	Д – І	34,75±5,32	43,53±5,01	40,26±2,90
	Д – II	44,53±9,07	47,33±3,06	44,90±4,88*
	Д – III	34,01±4,70	46,18±5,74	41,35±2,58
Креатинін, мкмоль/л	К	89,80±8,16	112,16±4,91	114,68±3,29
	Д – І	96,81±6,18	109,43±3,93	105,97±4,20*
	Д – II	98,75±7,75	110,23±4,39	106,12±5,61*
	Д – III	92,03±7,36	106,36±5,38	108,63±6,04
Сечовина, ммоль/л	К	5,66±0,62	3,83±0,24	4,58±0,46
	Д – І	6,18±0,67	3,60±0,46	4,25±0,64
	Д – II	5,78±0,79	3,70±0,64	4,45±0,53
	Д – III	6,33±0,13	3,76±0,54	4,40±0,17

Застосування у раціоні кролів цинку та селену цитратів знижує активність АСТ і АЛТ відповідно на 16,9 (p<0,01) і 13,0 % (p<0,05) і на 23,5 (p<0,01) і 18,5 % (p<0,05) на 29 добу дослідження порівняно з контрольною групою (табл. 20). Зниження рівня АСТ і АЛТ є у межах фізіологічних параметрів [Leineweber, C., 2018], що може вказувати на покращення функціонування печінки кролів за випоювання цинку цитрату та селену цитрату в умовах сильного теплового стресу. Отже, зниження рівня АСТ та АЛТ вказує на покращення функціонування печінки та цілісність гепатоцитів тварин в умовах сильного теплового стресу.

Таблиця 20

Активність амінотрансфераз та лужної фосфатази у крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, (M±SD, n=6)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
АСТ, Од/л	К	16,45±1,73	16,23±2,63	20,41±2,01

продовження таблиці 20

	Д – I	20,31±3,79	14,93±1,77	16,96±1,01**
	Д – II	16,45±2,32	15,83±2,89	17,75±0,67*
	Д – III	21,20±5,79	15,21±1,57	18,35±1,51
АЛТ, Од/л	К	55,36±8,52	71,61±7,41	73,13±6,92
	Д – I	58,36±7,81	65,35±4,35	55,88±6,09**
	Д – II	51,43±9,43	70,95±7,49	59,56±7,20*
	Д – III	61,11±9,24	68,45±8,09	72,91±6,55
Лужна фосфатаза, Од/л	К	404,23±69,29	325,70±36,90	317,85±34,40
	Д – I	441,81±65,50	312,92±33,47	300,23±42,87
	Д – II	462,05±47,02	308,72±32,90	305,38±58,99

Вміст холестеролу у крові кролів I, II і III дослідних груп вірогідно зменшувався, стосовно контрольної групи на 27,3 % ($p<0,001$), 17,8 % ($p<0,01$) і 15,4 % ($p<0,05$) на 29 добу дослідження, порівняно з контролем (табл. 21). Зниження рівня холестеролу за вypoювання цинку цитрату, може бути пов'язано з тим, що Цинк зменшує інтенсивність ліполізу у жировій тканині й призводить до розпаду ТАГ, що зберігаються в адипоцитах [Maan, M., 2018]. Додавання селену цитрату в умовах теплового стресу, сприяє захисту від оксидативного пошкодження та зумовлює збереженню структурної цілісності клітин й клітинних органел [Rashid, M. T., 2024]. Германій проявляє інгібуючий вплив щодо пероксидного окиснення ліпідів в організмі [Yang, M. K., 1999]. Тому, можливо це сприяє зменшенню рівня холестеролу крові в стресових умовах, що покращує ліпідний обмін в організмі кролів.

Дослідженнями на щурах встановлено, що дефіцит цинку призводить до зменшення абсорбції холестеролу в кишечнику, що власне свідчить про його зниження у крові [Koo, S. I., 1986]. Таким чином, вypoювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів опосередковано впливає на якісний склад ліпідів в організмі кролів.

Таблиця 21

Вміст холестеролу, триацилгліцеролів, загального кальцію та неорганічного фосфору в крові кролів за вypoювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, ($M\pm SD$, $n=6$)

Показники	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Триацилгліцероли, ммоль/л	К	0,87±0,10	0,43±0,11	0,49±0,07
	Д – I	0,70±0,15	0,37±0,05	0,42±0,08
	Д – II	0,69±0,17	0,38±0,10	0,39±0,09
	Д – III	0,71±0,12	0,39±0,03	0,44±0,06
Холестерол, ммоль/л	К	0,57±0,19	0,74±0,03	0,84±0,08
	Д – I	0,62±0,10	0,65±0,10	0,61±0,05***

продовження таблиці 21

	Д – II	0,69±0,15	0,71±0,07	0,69±0,04**
	Д – III	0,65±0,10	0,73±0,12	0,71±0,06*
Загальний кальцій, ммоль/л	К	3,01±0,25	3,15±0,16	2,81±0,19
	Д – I	2,83±0,17	3,01±0,22	2,80±0,12
	Д – II	2,80±0,16	2,95±0,1	2,70±0,20
	Д – III	3,01±0,23	3,10±0,21	2,83±0,25
Неорганічний фосфор ммоль/л	К	1,98±0,13	1,85±0,25	1,95±0,12
	Д – I	1,91±0,23	1,80±0,22	1,90±0,17
	Д – II	2,00±0,20	2,16±0,53	1,83±0,15
	Д – III	1,95±0,22	2,23±0,20	1,83±0,24

Отже, випоювання кролям цинку та селену цитратів за умов сильного теплового стресу відзначилося більше вираженими позитивними змінами біохімічних показників крові кролів впродовж дослідження. Додавання до раціону кролів германію цитрату у меншій мірі знижувало негативну дію підвищених температур на їхній організм.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [[Юзв'як, М. О., 2024](#); [Юзв'як, М. О., 2024](#)].

7. Стан антиоксидантного захисту організму кролів за випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах сильного теплового стресу

У результаті проведених досліджень встановлено, що випоювання наночастинок цинку та селену цитратів знижує вміст ГПЛ у плазмі крові кролів на 42,5 і 37,0 % ($p < 0,001$) та 34,7 ($p < 0,001$) і 27,6 % ($p < 0,01$) на 14 і 29 добу дослідження порівняно з контрольною групою, що свідчить про позитивний ефект застосованих сполук (табл. 22). Селен є складовою частиною активного центру ензиму ГП і захищає клітинні мембрани від ліпідних пероксидів та H_2O_2 [[Shahidin, 2025](#)]. Результати нашого дослідження підтверджують ефективність випоювання наночастинок цинку та селену цитратів підсилювати антиоксидантну дію в організмі кролів, що підтверджується зниженням вмісту ГПЛ у плазмі крові кролів. Літературні джерела вказують, що дефіцит цинку спричиняє оксидативний стрес [[Kloubert, V., 2015](#)], тому додавання до раціону кролів цинку цитрату є важливими для у забезпеченні антиоксидантного захисту клітин. Таким чином, випоювання наночастинок цинку та селену цитратів є ефективними сполуками, що захищають клітину від оксидативного стресу.

Аналіз отриманих даних щодо вмісту ТБК-активних продуктів вказує, що вірогідних відмінностей між групами не встановлено, проте спостерігається позитивна загальна тенденція до зниження величин значень показника у дослідних групах порівняно з контролем. Це може свідчити про певний захисний вплив наночастинок цитратів цинку, селену та германію на антиоксидантну систему організму кролів в умовах сильного теплового стресу,

що проявляється у менш інтенсивному накопиченні продуктів пероксидного окиснення ліпідів.

Таблиця 22

Продукти пероксидного окиснення ліпідів у плазмі кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, (M±SD, n=6)

Показники	Групи тварин	Період дослідження		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Гідроперокси ліпідів, Од Е/мл	К	0,90±0,084	1,81±0,160	2,13±0,426
	Д – І	0,78±0,047	1,04±0,212***	1,39±0,257***
	Д – II	0,80±0,064	1,14±0,242***	1,54±0,126**
	Д – III	0,90±0,132	1,17±0,087	1,85±0,102
ТБК-активні продукти, нмоль/мл	К	1,40±0,199	1,99±0,220	2,22±0,384
	Д – І	1,50±0,254	1,72±0,433	1,93±0,259
	Д – II	1,67±0,244	1,82±0,374	1,91±0,154
	Д – III	1,42±0,218	1,63±0,436	2,19±0,465

Результатами дослідження встановлено, що за випоювання цинку цитрату та селену цитрату в еритроцитах підвищується активність СОД на 66,7 % ($p<0,01$) та 46,6 % ($p<0,05$) на 29 добу експерименту (табл. 23). Наночастинки цинку активують транскрипційний фактор Nrf2, які кодують антиоксидантні ензими, зокрема СОД [Marreiro, D. D. N., 2017]. Селен впливає на активність СОД через вплив на селенопротеїни, зокрема через ГП та селенопротеїн Р, що забезпечує активність СОД у нейтралізації O_2^- [Huang, Z., 2012]. Дослідженнями Homma та ін. (2013) встановлено, що дефіцит Цинку, призводить до мутантної форми СОД, спричиняє хронічний стрес ендоплазматичного ретикулуму і порушує синтез протеїну та індукцію транспортера цинку Zip-14 [Homma, K., 2013].

З урахуванням вище зазначеного, можна зробити висновок, що випоювання наносполук цинку та селену цитратів є біодоступнішим для організму кролів, та сприяє посиленню антиоксидантної активності СОД за умов сильного теплового стресу.

КАТ є металоензимом, що містить гемові групи у своїй структурі й виконує роль каталітичного центру в реакціях, що нейтралізують активні форми Оксигену, розщеплюючи H_2O_2 на воду та Оксиген [Nandi, A., 2019]. За випоювання наночастинок цинку та селену цитратів активність КАТ становила 32,6 та 26,3 % ($p<0,05$) на 29 добу дослідження порівняно з контролем. Додавання наномікроелементів цинку та селену цитратів впливають на експресію генів за умов сильного теплового стресу, кодують антиоксидантні ензими, зокрема КАТ, що захищає клітини від оксидативного стресу [Chen, X., 2022; Cortese, M. M., 2008].

Таблиця 23

Показники антиоксидантної системи в еритроцитах крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, (M±SD, n=6)

Показники	Групи тварин	Період дослідження		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Супероксиддисмутаза, од/ мг протеїну	К	6,20±1,499	5,58±1,095	4,93±1,223
	Д – І	7,36±1,181	6,14±1,095	8,22±1,370**
	Д – II	8,00±1,547	5,72±0,901	7,23±1,405*
Каталаза, ммоль H ₂ O ₂ /хв×1 мг протеїну	Д – III	6,96±1,039	6,82±1,287	5,53±1,030
	К	90,08±5,764	97,29±13,263	74,94±4,405
	Д – І	91,80±4,126	100,6±9,612	99,44±8,113*
	Д – II	97,71±4,766	98,69±13,343	94,67±17,880*
	Д – III	92,63±5,179	101,6±3,981	91,80±13,528

За випоювання цинку цитрату спостерігали підвищений вірогідний вміст ВГ на 72,5 (p<0,01) і 58,3 % (p<0,05) та селену цитрату на 80,0 (p<0,01) і 79,1 % (p<0,001) на 14 та 29 добу порівняно з контрольною групою тварин (табл. 24). Цинк бере участь у синтезі глутатіону шляхом активації ензиму глутаматцистеїнлігази, що каталізує утворення ВГ та регулює клітинні процеси антиоксидантного захисту [Ngo, V., 2022]. Антиоксидантна дія Селену та ВГ відбувається через взаємодію з ензимом ГР, що використовує ВГ, як донор електронів для відновлення H₂O₂ та органічних пероксидів [Lubos, E., 2011]. Випоювання наночастинок цинку та селену цитратів сприяє підвищенню вмісту ВГ в організмі кролів, що свідчить про активацію антиоксидантного захисту клітин за умов сильного теплового стресу.

ГП належить до класу селенопротеїнів. Кожен мономер цього ензиму має атом селену в активному центрі і заміщає Сульфур в амінокислоті цистеїну, утворюючи селеноцистеїн, що є каталізатором реакцій детоксикації пероксидів [Day, B. J., 2009]. За випоювання наночастинок селену, активність ГП у крові кролів, була вірогідно вищою на 73,0 % (p<0,001) та 63,2 % (p<0,01) порівняно з контрольною групою на 14 та 29 добу дослідження (табл. 24). На нашу думку, в умовах сильного теплового стресу, випоювання селену цитрату збільшує експресію ГП і знижує рівень токсичних пероксидів у крові.

Таблиця 24

Глутатіонпероксидазна активність еритроцитів крові кролів за випоювання сполук цитратів цинку, селену та германію в умовах сильного теплового стресу, (M±SD, n=6)

Показники	Групи тварин	Період дослідження		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба

продовження таблиці 24

Глутатіонредуктаза, мкмоль НАДФН/хв × мг протеїну	К	0,84±0,104	0,63±0,067	0,48±0,110
	Д – І	0,78±0,068	0,67±0,171	0,45±0,047
	Д – ІІ	0,75±0,140	0,61±0,171	0,50±0,146
	Д – ІІІ	0,80±0,09	0,74±0,132	0,51±0,063
Відновлений глутатіон, ммоль/л	К	0,058±0,009	0,040±0,006	0,024±0,005
	Д – І	0,066± 0,004	0,069±0,016**	0,038±0,008*
	Д – ІІ	0,059±0,010	0,072±0,018**	0,043±0,006***
	Д – ІІІ	0,063±0,007	0,051±0,005	0,034±0,006
Глутатіонпероксидаза, мкмоль глутатіону/хв × мг протеїну	К	33,59±2,66	10,35±2,06	5,88±1,32
	Д – І	35,74±4,54	13,24±3,26	6,17±1,61
	Д – ІІ	37,95±1,93	17,91±2,27***	9,60±1,58**
	Д – ІІІ	32,81±4,31	12,32±1,24	7,27±1,89

Отже, випоювання наночастинок мікроелементів у раціоні кролів після відлучення за умов сильного теплового стресу сприяло позитивним змінам функціонування системи антиоксидантного захисту з вираженим впливом цинку цитрату та селену цитратів, що позначилося нижчим рівнем ГПЛ у плазмі крові та вищою активністю СОД, КАТ, ГП і вмісту ВГ у еритроцитах крові на 14 та 29 добу дослідження порівняно з контрольною групою. Додавання германію цитрату в умовах сильного теплового стресу не мало значного впливу на СОД, КАТ та глутатіонову систему організму кролів. Відсутність статистично вірогідних змін за випоювання германію цитрату, може вказувати на слабкий або опосередкований вплив на антиоксидантну систему організму кролів і можливо потребує оцінки ефективності дії сполуки при інших дозах або тривалішого використання.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Юзв'як, М. О., 2024; Юзв'як, М., 2024; Yuzviak, M. O., 2025; Юзв'як, М., 2025].

8. Вплив цинку, селену і германію цитратів на зміни рівня ліпідів за умов сильного теплового стресу

Додавання до раціону кролів германію цитрату у крові підвищило рівень загальних ліпідів за умов сильного теплового стресу на 58,6 % ($p < 0,001$) на 14 добу експерименту (табл. 25). Такі зміни в організмі кролів, можливо зумовлено активацією обмінних речовин для забезпечення енергетичного балансу та структурної цілісності клітинної мембрани в період сильного теплового стресу.

Вміст ТАГ знижувався при випоюванні цинку цитрату на 35,1 % ($p < 0,05$) за умов сильного теплового стресу на 29 добу (табл. 25). На нашу думку, можливо, наночастинок цинку стимулювали активність ліпази або інших ліполітичних ензимів, що призводить до інтенсивнішого розщеплення ТАГ та

використовується в організмі кролів, для забезпечення енергетичних процесів у клітинні за умов сильного теплового стресу.

Неестерифіковані жирні кислоти (НЕЖК) є біомаркером негативного енергетичного балансу коли надходження глюкози є недостатнім для енергетичних потреб клітин [Li, X., 2012]. Виконує роль енергетичного субстрату та основного компонента мембран. Вміст НЕЖК збільшувався на завершальному етапі дослідження на 79,2 % ($p < 0,01$) за впоювання цинку цитрату (табл. 25). Таким чином, можливо підвищений рівень НЕЖК при впоюванні наночастинок цинку вказує на активний метаболізм ліпідів для забезпечення енергетичних потреб організму кролів за умов теплового стресу.

Таблиця 25

Співвідношення класів ліпідів у плазмі крові кролів за умов сильного теплового стресу за впоювання наночастинок цинку, селену і германію цитратів, (%), ($M \pm SD$, $n=6$)

Класи ліпідів	Група тварин	Період досліджень		
		Підготовчий	Дослідний	
			14-та доба	29-та доба
Загальні ліпіди, г/л	К	3,71 $\pm$ 0,39	3,00 $\pm$ 0,64	3,27 $\pm$ 0,48
	Д – І	4,21 $\pm$ 0,27	3,98 $\pm$ 0,94	3,61 $\pm$ 0,41
	Д – II	3,21 $\pm$ 0,78	2,73 $\pm$ 0,38	2,98 $\pm$ 0,37
	Д – III	3,15 $\pm$ 0,42	4,76 $\pm$ 0,46***	3,45 $\pm$ 0,75
Естерифікований холестерол	К	10,15 $\pm$ 2,28	9,21 $\pm$ 1,44	7,11 $\pm$ 1,76
	Д – І	9,86 $\pm$ 0,84	7,52 $\pm$ 1,88	6,20 $\pm$ 1,09
	Д – II	9,89 $\pm$ 0,70	8,13 $\pm$ 2,00	7,71 $\pm$ 1,63
	Д – III	8,89 $\pm$ 0,82	10,43 $\pm$ 2,56	9,62 $\pm$ 1,83
Триацилгліцероли	К	15,14 $\pm$ 1,23	13,62 $\pm$ 2,41	14,75 $\pm$ 4,30
	Д – І	13,79 $\pm$ 0,70	11,84 $\pm$ 3,38	9,57 $\pm$ 1,51*
	Д – II	14,22 $\pm$ 1,00	10,90 $\pm$ 2,03	11,28 $\pm$ 2,33
	Д – III	14,24 $\pm$ 1,53	12,47 $\pm$ 3,23	12,46 $\pm$ 1,25
Диацилгліцероли	К	12,25 $\pm$ 1,18	7,54 $\pm$ 0,89	8,61 $\pm$ 1,88
	Д – І	10,23 $\pm$ 1,31	7,84 $\pm$ 2,21	6,42 $\pm$ 0,44
	Д – II	11,40 $\pm$ 2,32	6,75 $\pm$ 1,92	6,85 $\pm$ 0,63
	Д – III	10,17 $\pm$ 1,58	7,70 $\pm$ 2,04	6,52 $\pm$ 0,61
Вільний холестерол	К	15,71 $\pm$ 1,36	10,95 $\pm$ 1,55	11,90 $\pm$ 2,88
	Д – І	16,89 $\pm$ 1,33	11,79 $\pm$ 2,87	12,08 $\pm$ 3,43
	Д – II	16,62 $\pm$ 1,25	8,96 $\pm$ 1,57	11,92 $\pm$ 2,06
	Д – III	15,78 $\pm$ 0,72	13,62 $\pm$ 2,63	8,87 $\pm$ 0,92
НЕЖК	К	10,44 $\pm$ 2,07	8,20 $\pm$ 0,93	6,35 $\pm$ 1,29
	Д – І	10,61 $\pm$ 1,76	10,95 $\pm$ 3,08	11,38 $\pm$ 2,00**
	Д – II	11,11 $\pm$ 2,05	7,37 $\pm$ 1,78	8,87 $\pm$ 2,37
	Д – III	11,19 $\pm$ 1,16	7,52 $\pm$ 1,35	9,34 $\pm$ 2,48

продовження таблиці 25

Моноацилгліцероли	К	9,33±1,06	10,88±1,87	10,21±1,92
	Д – І	10,75±0,93	11,70±0,96	10,03±2,58
	Д – ІІ	8,92±1,31	13,71±2,68	7,80±0,74
	Д – ІІІ	9,36±0,77	9,69±1,69	11,73±0,91
Фосфоліпіди	К	26,96±2,59	40,75±2,56	41,54±3,77
	Д – І	27,73±2,29	38,33±7,99	45,29±2,93
	Д – ІІ	27,82±1,85	44,15±3,53	45,57±3,22
	Д – ІІІ	30,34±1,70	38,55±4,95	41,43±2,50

Вірогідних змін вмісту класів фосфоліпідів у плазмі крові кролів в умовах сильного теплового стресу за випоювання наночастинок цинку, селену і германію цитратів не виявлено, відзначено лише позитивні тенденції упродовж експерименту. Це може вказувати на більш виражений активуючий вплив вище зазначених наночастинок у температурних умовах помірного стресу, а за впливу сильного теплового стресу свідчить на регуляторний вплив у забезпеченні гомеостазу фосфоліпідного складу крові кролів.

Отже, отримані результати дослідження випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів не мали вірогідного впливу на рівень класів фосфоліпідів у крові кролів за умов сильного теплового стресу, можливо це пов'язано, з тим, що температурно-вологісні умови, обмежили можливість проявити вплив застосованих сполук. Показники ліпідного складу плазми крові були менш виражені, ніж за помірного стресу, проте випоювання цинку цитрату зменшує рівень ТАГ ($p < 0,05$) на 29 добу та підвищує вміст НЕЖК ($p < 0,01$) на 29 добу. Випоювання германію цитрату збільшує рівень загальних ліпідів ($p < 0,001$) на 14 добу дослідження. Таким чином, отримані результати вказують на опосередковану метаболічну активність застосованих сполук, незважаючи на незначні вірогідні зміни показників ліпідного складу в організмі кролів.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Юзв'як, М. О., 2025; Yuzviak, M., 2026].

9. Вміст мікроелементів у тканинах організму кролів за випоювання наночастинок цинку, селену і германію цитратів в умовах сильного теплового стресу

Надходження достатньої кількості і макро- і мікроелементів у раціоні тварин є важливим для забезпечення функціонування метаболічних процесів в організмі тварин [Заславський, С., 2024]. Дослідження вмісту макро- і мікроелементів у гранульованому комбікормі для кролів, згідно з документом «Рекомендації щодо харчування домашніх кролів» від Європейської федерації індустрії кормів для домашніх тварин за 2024 рік [FEDIAF, 2024], встановлено, що застосований раціон, загалом відповідає нормативним показникам їхнього вмісту. За винятком даних вмісту Ge, Ni, Cd, Pb, проте у Директиві 2002/32/ЄС вказано, що для тварин допустимий рівень Cd – 1 мг/кг корму, Pb – 5 мг/кг корму [Directive 2002/32/EC, 2002]. Ці дані відповідають встановленим параметрам. Аналіз вмісту макро- і мікроелементів у воді відповідає

Державним санітарним нормам «Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) (редакція від 17.01.2025 року) та вказує на допустимий рівень концентрації мікроелементів у воді [[ДСанПіН 2.2.4-171-10, 2010](#)]. Однак, за умов теплового стресу, мінеральний обмін, може порушуватись, через дію оксидативного стресу, що негативно впливає на метаболізм та перебіг фізіологічних процесів організму тварин. Тому, важливо було, з'ясувати вплив наночастинок цинку, селену і германію цитратів на вміст мікроелементів у тканинах організму кролів за умов сильного теплового стресу.

Відзначено вірогідні зміни за вживання селену та германію цитратів, підвищенням вмісту Fe в м'язовій тканині кролів на 74,5 та 81,4 % ($p < 0,001$) стосовно контрольної групи (табл. 26). Ферум бере участь у транспортуванні кисню і є необхідним кофактором, для синтезу гемоглобіну, міоглобіну і стимулює еритропоез [[Robach, P., 2007](#)]. Отриманий результат в нашому дослідженні вказує, що наночастинок сприяють депонуванню Fe в м'язах, що є необхідним для транспортування Оксигену, поживних речовин, забезпеченні анаеробного енергозабезпечення м'язів та виведенні молочної кислоти в умовах теплового стресу, що є підтвердженням літературних джерел.

Дослідженням виявлено вірогідне збільшення Mn в м'язовій тканині на 43,1 % ($p < 0,01$) за вживання цинку цитрату (табл. 26). Встановлено, що вживання селену цитрату, зумовило збільшення Mn на 65,6 % ($p < 0,001$) в крові і на 33,6 % ($p < 0,05$) в м'язовій тканині. Вживання германію цитрату зумовило збільшення концентрації мікроелементу Mn в печінці на 36,1 % ($p < 0,05$) відносно контрольної групи. Цинк і Манган мають спільні цинк регулюючі транспортери (ZIP), насамперед ZIP8, що експресуються в печінці та скелетних м'язах. Селен входить до активного центру ГП, що активує антиоксидантний захист організму кролів та зменшує оксидативний стрес, та підвищує експресію Mn-залежної супероксиддисмутази збільшуючи кількість Mn в м'язових волокнах [[Piršljina, J., 2005](#)]. Германій швидко розподіляється по організму та адсорбується в легенях та слизовій оболонці шлунково-кишкового тракту. У різних кількостях він розподіляється в тканинах та органах [[Keith, L. S., 2015](#)]. Незважаючи на те, що Германій не затримується вибірково в жодній тканині [[Li, L. J., 2017](#)] він взаємодіє з ензимними системами організму, що можливо впливає на обмін мікроелементів у тому числі і Mn.

З літературних джерел відомо про антагоністичний вплив Цинку та Купруму на рівні абсорбції та метаболізму [[Ao, T., 2009](#)], проте на клітинному рівні є синергістами [[Zheng, M., 2023](#)]. Активність ензиму Cu/Zn-супероксиддисмутази (SOD1) залежить від наявності іонів Zn^{2+} та Cu^{2+} , де Цинк виконує структурну функцію і не бере участь в каталітичній активності, а Купрум функціонує, як каталізатор реакції дисмутації супероксидних форм кисню [[Sun, Z., 2023](#)]. Фізіологічний антагонізм між цими мікроелементами проявляється на рівні травної системи, де надмірна кількість Цинку в тонкому кишечнику активує експресію металотіонеїну (MT) в ентероцитах. Іони Cu^{2+} мають більшу спорідненість до сайтів зв'язування з MT та утворюють міцні

комплекси, незважаючи на те, що Цинк є індуктором синтезу цього протеїну [Антоняк, Г. Л., 2011; Munie, S., 2021; Stiles, L. I., 2024]. У проведеному нами дослідженні випоювання цинку цитрату в кількості 12 мг/кг маси тіла збільшує на 45,2 % ($p < 0,05$) рівень Cu в тканині печінки та вказує на його депонування в тканинах печінки за умов сильного теплового стресу. Це може бути важливим механізмом захисту організму кролів, що забезпечує підвищення активності антиоксидантної системи за стресових умов.

Випоювання наночастинок селену та германію цитратів зменшує кількість Co в крові на 19,1 % ($p < 0,001$) та 17,5 % ($p < 0,01$) відповідно (табл. 26). Додавання германію цитрату знижує вміст Co в нирках на 15,4 % ($p < 0,05$). При цьому у шерсті кролів рівень Co відповідно збільшився у I, II і III групі на 24,3; 23,3 % ($p < 0,05$) та 33,1 % ($p < 0,01$) за випоювання цинку, селену та германію цитратів. Цинк та Кобальт мають спільного транспортера двовалентних катіонів (DMT1), що всмоктуються в кишечнику. Встановлено, що трансферин є основним протеїном плазми, що бере участь у транспорті Fe до клітин. Літературні дані вказують на те, що Co конкурує із Fe за трансферин [Loréal, O., 2014], що власне пояснює зменшення вмісту Co у внутрішніх органах та його концентрацію у шерсті кролів. Такі, зміни вказують на взаємодію мікроелементів та їх транспортних систем, що впливає на розподіл Co у різних органах та тканинах, що може впливати на адаптаційні та антиоксидантні механізми в організмі кролів.

Дослідження тканин організму кролів встановлено, що випоювання селену цитрату підвищило рівень Ni у шерсті кролів на 62,7 % ($p < 0,01$) (табл. 26). Вірогідні зміни виявлено при додаванні германію цитрату, що знижує вміст Ni у тканинах печінки на 32,0 % ($p < 0,05$) та підвищує у шерсті кролів на 88,2 % ($p < 0,001$) стосовно контролю та вказує на перерозподіл Ni із вісцеральних органів та його збільшення у шерсті кролів, що підтверджується механізмом взаємодії селеніду нікелю та протеїнового комплексу Ni-селенід [Khandelwal, S., 1990].

Показники концентрації Cd в шерсті кролів вірогідно підвищились на 94,1 та 58,8 % ($p < 0,001 - 0,05$) за випоювання селену та германію цитратів (табл. 26). Дослідженнями встановлено, що Селен знижує токсичність Cd через секвестрацію у біологічно стабільні комплекси та через Se-залежні антиоксидантні ензими [Zwolak, I., 2020]. На нашу думку, випоювання наночастинок селену цитрату, зумовлює накопичення Cd у шерсті, що тим самим вивільняє організм від токсинів через процес линяння. Вплив германію цитрату, можливо є опосередкованим, через антиоксидантний захист організму в період теплового стресу, що впливає на перерозподіл цього елемента з інших органів до волосяних фолікул кролів.

Отже, отримані результати дослідження вказують на корекцію мінерального обміну в організмі кролів за випоювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів за умов сильного теплового стресу.

Результати цього підрозділу опубліковані у наукових працях та тезах [Юзв'як, М., 2025; Юзв'як, М. О., 2026].

Таблиця 26

Вміст мікроелементів у тканинах кролів за випоювання цинку, селену і германію цитратів за умов сильного теплового стресу ($M \pm SD$, $n=6$)

Мікро- елемент	Група	Орган/Тканина				
		Кров, мл/л	Печінка мг/кг	Нирки мг/кг	М'язи мг/кг	Шерсть мг/кг
1	2	3	4	5	6	7
Fe	К	388,74 $\pm$ 45,380	131,17 $\pm$ 17,379	44,859 $\pm$ 6,249	2,341 $\pm$ 0,283	19,966 $\pm$ 2,905
	Д – I	398,51 $\pm$ 39,431	133,15 $\pm$ 18,387	52,668 $\pm$ 5,465	2,212 $\pm$ 0,478	18,752 $\pm$ 4,054
	Д – II	406,43 $\pm$ 76,380	121,81 $\pm$ 30,994	48,228 $\pm$ 6,618	4,086 $\pm$ 0,687***	14,666 $\pm$ 4,129
	Д – III	443,52 $\pm$ 54,161	111,30 $\pm$ 22,603	47,773 $\pm$ 4,529	4,248 $\pm$ 0,855***	22,132 $\pm$ 4,644
Mn	К	0,064 $\pm$ 0,010	1,688 $\pm$ 0,198	1,581 $\pm$ 0,169	0,095 $\pm$ 0,008	0,224 $\pm$ 0,025
	Д – I	0,065 $\pm$ 0,013	1,759 $\pm$ 0,176	1,394 $\pm$ 0,380	0,136 $\pm$ 0,025**	0,179 $\pm$ 0,027
	Д – II	0,106 $\pm$ 0,017***	1,875 $\pm$ 0,332	1,405 $\pm$ 0,219	0,127 $\pm$ 0,015*	0,188 $\pm$ 0,020
	Д – III	0,068 $\pm$ 0,014	2,299 $\pm$ 0,450*	1,548 $\pm$ 0,221	0,106 $\pm$ 0,013	0,197 $\pm$ 0,039
Cu	К	1,532 $\pm$ 0,245	2,847 $\pm$ 0,499	4,408 $\pm$ 0,516	2,102 $\pm$ 0,331	6,310 $\pm$ 1,162
	Д – I	2,008 $\pm$ 0,456	4,135 $\pm$ 0,690*	4,612 $\pm$ 0,856	1,910 $\pm$ 0,208	6,045 $\pm$ 0,759
	Д – II	1,585 $\pm$ 0,401	3,075 $\pm$ 0,700	4,099 $\pm$ 0,758	2,554 $\pm$ 0,561	5,100 $\pm$ 0,720
	Д – III	1,618 $\pm$ 0,340	3,697 $\pm$ 0,753	3,920 $\pm$ 0,603	1,642 $\pm$ 0,217	5,461 $\pm$ 0,663
Co	К	0,518 $\pm$ 0,043	0,519 $\pm$ 0,053	0,558 $\pm$ 0,433	0,210 $\pm$ 0,045	0,488 $\pm$ 0,053
	Д – I	0,461 $\pm$ 0,030	0,504 $\pm$ 0,050	0,547 $\pm$ 0,050	0,209 $\pm$ 0,038	0,607 $\pm$ 0,077*
	Д – II	0,419 $\pm$ 0,038***	0,495 $\pm$ 0,057	0,524 $\pm$ 0,039	0,191 $\pm$ 0,032	0,602 $\pm$ 0,040*
	Д – III	0,427 $\pm$ 0,033**	0,453 $\pm$ 0,084	0,472 $\pm$ 0,044*	0,223 $\pm$ 0,027	0,650 $\pm$ 0,088**
Ni	К	1,434 $\pm$ 0,315	1,233 $\pm$ 0,293	1,891 $\pm$ 0,170	0,347 $\pm$ 0,097	0,365 $\pm$ 0,083
	Д – I	1,285 $\pm$ 0,172	1,197 $\pm$ 0,148	1,748 $\pm$ 0,306	0,439 $\pm$ 0,115	0,272 $\pm$ 0,076
	Д – II	1,011 $\pm$ 0,226	1,227 $\pm$ 0,180	1,588 $\pm$ 0,183	0,459 $\pm$ 0,093	0,594 $\pm$ 0,057**
	Д – III	1,303 $\pm$ 0,338	0,838 $\pm$ 0,233*	1,735 $\pm$ 0,476	0,269 $\pm$ 0,055	0,687 $\pm$ 0,129***

продовження таблиці 26

Cd	К	0,162±0,025	0,219±0,026	0,495±0,044	0,052±0,007	0,017±0,004
	Д – I	0,183±0,022	0,213±0,022	0,440±0,056	0,069±0,015	0,021±0,005
	Д – II	0,175±0,026	0,202±0,024	0,479±0,082	0,048±0,012	0,033±0,007***
	Д – III	0,187±0,046	0,182±0,048	0,378±0,099	0,056±0,007	0,027±0,006*
Pb	К	0,495±0,084	0,734±0,089	0,804±0,079	0,473±0,124	0,506±0,130
	Д – I	0,475±0,068	0,671±0,122	0,874±0,232	0,485±0,108	0,647±0,109
	Д – II	0,446±0,116	0,601±0,108	0,654±0,144	0,503±0,085	0,516±0,125
	Д – III	0,527±0,104	0,636±0,163	0,684±0,138	0,531±0,099	0,629±0,149

ВИСНОВКИ

1. Застосування наносполук цинку (12 мг/кг маси тіла), селену (60 мкг/кг маси тіла) та германію (12,5 мкг/кг маси тіла) цитратів у раціоні кролів після відлучення позитивно впливало на киснево-транспортну функцію крові за умов помірного та сильного теплового стресу з підвищенням кількості еритроцитів ($p < 0,05 - 0,01$), вмісту гемоглобіну ($p < 0,05 - 0,001$), гематокриту ($p < 0,05 - 0,01$) та зниження кількості лейкоцитів ($p < 0,05 - 0,01$) на 14 і 29 доби експерименту, що було виражено більшою мірою у тварин, яким вполювали цинку та селену цитрат.

2. Вполювання кролям наносполук мікроелементів зумовлює посилення адаптаційних процесів організму за умов помірного та сильного теплового стресу, зокрема за дії цинку цитрату у крові на 29 добу встановлено відповідно зниження активності АСТ (22,1 та 16,9 %), АЛТ (12,4 та 23,5 %) та менший вміст холестеролу (22,2 та 27,3 %), а за умов сильного теплового стресу і креатиніну (7,5 %), селену цитрат сприяв зменшенню рівня креатиніну (7,3 та 7,4 %), зниженню активності АСТ (13,6 та 13,0 %) і АЛТ (10,5 та 18,5 %), нижчому вмісту холестеролу (16,6 та 17,8 %). За умов помірного теплового стресу селену цитрат сприяв зменшенню рівня сечовини (11,3 та 17,7 %), германію цитрат позначився зниженням вмісту сечовини (19,9 і 20,3 %) на 14 і 29 доби експерименту.

3. За умов помірного теплового стресу вполювання наночастинок мікроелементів спричинило виражений антиоксидантний вплив на організм кролів, зокрема за дії: цинку цитрату встановлено нижчий рівень ГПЛ ($p < 0,001$) і ТБК-активних продуктів ($p < 0,01$) на 14 добу дослідження, вищу супероксиддисмутаазну активність ($p < 0,01$) на 29 добу; цинку і селену цитратів зумовило підвищення каталазної активності ($p < 0,01 - 0,001$; $p < 0,05$) та вмісту ВГ ($p < 0,01 - 0,001$) на 14 і 29 доби дослідження.

4. Застосування сполук наночастинок цинку та селену цитратів за умов сильного теплового стресу сприяло активації системи антиоксидантного захисту, що спричинило зниження інтенсивності процесів пероксидного окиснення ліпідів та підвищення активності ключових антиоксидантних ензимів, зокрема зниження вмісту ГПЛ ($p < 0,01 - 0,001$) на 14 і 29 доби, підвищення супероксиддисмутаазної ($p < 0,05 - 0,01$) і каталазної ($p < 0,05$) активності на 29 добу. При цьому зафіксовано збільшення вмісту ВГ ($p < 0,05 - 0,001$) на 14 та 29 доби та підвищення глутатіонпероксидазної активності ($p < 0,01 - 0,001$) за вполювання селену цитрату на 14 та 29 доби експерименту.

5. Застосування наночастинок цинку, селену та германію цитратів за умов помірного і сильного теплового стресу суттєво модифікує ліпідний обмін у крові кролів, однак характер і вираженість змін залежала від елемента та інтенсивності стресового чинника. За умов помірного теплового стресу цинку цитрат знижував рівень естерифікованого холестеролу (21,1 і 13,5 %) та підвищував вміст фосфоліпідів (16,9 і 8,3 %) відповідно на 14 і 29 доби дослідження. Селену цитрат проявляє виражену гіпохолестеролову дію з

одночасним підвищенням вмісту фосфоліпідів (23,3 %) на 14 добу та моно- і диацилгліцеролів (26,3 %) на 29 добу експерименту. Германію цитрат зменшував вміст естерифікованого холестеролу (8,4 і 23,4 %), підвищував вміст фосфоліпідів (14,2 і 10,7 %) на 14 та 29 доби дослідження.

6. Випоювання кролям цинку цитрату впродовж 29 діб характеризувалося вищим рівнем Mn у м'язах на 43,1 %, Cu в печінці на 45,2 %, Co у шерсті на 24,3 % (табл. 26). Зміни вмісту вказаних мікроелементів були виражені більшою мірою у досліджуваних тканинах організму кролів за застосування наносполук селену й германію цитратів, зокрема вміст Fe у м'язах підвищився на 74,5 та 81,4 % ($p < 0,001$).

7. Додавання до раціону кролів наночастинок цинку та селену цитратів за умов сильного теплового стресу сприяло підвищенню частоти дихання на 11,5 та 16,4 % на 29 добу дослідження. Найбільше зниження ректальної температури у кролів на 0,8 °C було зафіксовано на 14 добу експерименту при випоюванні цинку цитрату. Водночас германію цитрат не виявив статистично значущого впливу на частоту дихання та ректальну температуру, що свідчить про відсутність вираженої дії на клінічні показники організму кролів за умов теплового стресу.

ОСНОВОПОЛОЖНІ НАУКОВІ ДЖЕРЕЛА

1. Abdelnour S. A., Alagawany M., Hashem N. M., Farag M. R., Alghamdi E. S., Hassan F. U., Bilal R. M., Elnesr S. S., Dawood M. A. O., Nagadi S. A., Elwan H. A. M., Almasoudi A. G., Attia Y. A. Nanominerals: Fabrication methods, benefits and hazards, and their applications in ruminants with special reference to selenium and zinc nanoparticles. *Animals*. 2021. Vol. 11, No. 7. Article 1916. [DOI: 10.3390/ani11071916](https://doi.org/10.3390/ani11071916).
2. Abdel-Wareth A. A. A., Amer S. A., Mobashar M., El-Sayed H. G. M. Use of zinc oxide nanoparticles in the growing rabbit diets to mitigate hot environmental conditions for sustainable production and improved meat quality. *BMC Veterinary Research*. 2022. Vol. 18, No. 1. Article 354. [DOI: 10.1186/s12917-022-03451-w](https://doi.org/10.1186/s12917-022-03451-w).
3. El-Gindy Y. M., Zahran S. M., Ahmed M. H., Ali A. M., Mohamed A. Z., Morshedy S. A. Counteract severe heat stress by including different forms of zinc in the rabbit bucks' diet. *Scientific Reports*. 2023 Aug 10. Vol. 13, No. 1. Article 12987 [DOI: 10.1038/s41598-023-39928-3](https://doi.org/10.1038/s41598-023-39928-3).
4. El-Ratel I. T., El-Kholy K. H., Elgmmal S. M., Fouda S. F., Abdel-Khalek A.-K. E., Hassan M. A., Azzam M. M., Alagawany M., Lestingi A. The synergetic effect of selenium or zinc oxide nanoparticles with chromium on mitigating thermal stress for sustainable production and improving antioxidant capacity and inflammatory cytokines of growing rabbits. *Archives Animal Breeding*. 2025. Vol. 68, No. 1. P. 43–55. [DOI: 10.5194/aab-68-43-2025](https://doi.org/10.5194/aab-68-43-2025).
5. Hassan F., Mobarez S., Mohamed M., Attia Y., Mekawy A., Mahrose K. Zinc and/or Selenium enriched spirulina as antioxidants in growing rabbit diets to alleviate the deleterious impacts of heat stress during summer season. *Animals*. 2021. Vol. 11, No. 3. Article 756. [DOI: 10.3390/ani11030756](https://doi.org/10.3390/ani11030756).

6. Liang Z. L., Chen F., Park S., Balasubramanian B., Liu W. C. Impacts of heat stress on rabbit immune function, endocrine, blood biochemical changes, antioxidant capacity and production performance, and the potential mitigation strategies of nutritional intervention. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022 May 26. Vol. 9. Article 906084. [DOI: 10.3389/fvets.2022.906084](https://doi.org/10.3389/fvets.2022.906084).
7. Marai I. F. M., Habeeb A. A. M., Gad A. E. Rabbit's productive, reproductive and physiological performance traits as affected by heat stress: A review. *Livestock Production Science*. 2002. Vol. 78, No. 2. P. 71–90. [DOI: 10.1016/S0301-6226\(02\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00091-X).
8. Oladimeji A. M., Johnson T. G., Metwally K., Farghly M., Mahrose K. M. Environmental heat stress in rabbits: Implications and ameliorations. *International Journal of Biometeorology*. 2022. Vol. 66, No. 1. P. 1–11. [DOI: 10.1007/s00484-021-02191-0](https://doi.org/10.1007/s00484-021-02191-0).
9. Wang Y.-S., Teng G.-Q., Zhou H., Dong C.-L. Germanium reduces inflammatory damage in mammary glands during lipopolysaccharide-induced mastitis in mice. *Biological Trace Element Research*. 2020. Vol. 198, No. 2. P. 617–626. [DOI: 10.1007/s12011-020-02106-x](https://doi.org/10.1007/s12011-020-02106-x).
10. Влізло В. В., Федорук Р. С., Ратич І. Б. Лабораторні методи досліджень у біології, тваринництві та ветеринарній медицині : монографія. Львів : Сполом; 2012. 764 с. ISBN 976-966-665-677-6. URL: <https://www.inenbiol.com/index.php/diialnist/publikatsii/knyhy/63-diialnist/publikaciii/knyhy/349-laboratorni-metody-doslidzen-u-biolohii-tvarynnytstvi-ta-veterynarii-medytyni>

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ І ВАЖЛИВІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ, НАУКОВИХ ЗДОБУТКІВ

Отримані результати дослідження є науково обґрунтованими і дають підставу рекомендувати додаткове введення кількостей: цинку цитрат – 12 мг/кг маси тіла, селену цитрат – 60 мкг/кг маси тіла, германію цитрат – 12,5 мкг/кг маси тіла для зниження негативного впливу теплового стресу в організмі молодняку кролів після відлучення. Результати досліджень біохімічного, гематологічного, ліпідного, мінерального профілю та антиоксидантного захисту організму кролів за випоювання цинку, селену та германію цитратів, можуть бути використанні для теоретичного обґрунтування оптимальних кількостей наномікроелементів в умовах впливу високих температур довкілля.

Основні результати та матеріали роботи впроваджено у навчальний процес Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнології імені С. З. Гжицького при викладанні дисциплін «Фізіологія тварин» та «Ветеринарна патофізіологія» (**Додаток Б**), а також у Дрогобицькому державному педагогічному університеті імені Івана Франка при викладанні дисциплін «Зоологія», «Регуляція обміну речовин» та «Фізіологія адаптації» при підготовці фахівців першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня вищої освіти (**Додаток В**).

Схему застосування наночастинок цинку, селену та германію цитратів для пом'якшення негативного впливу теплового стресу на молодняк кролів

включено до методичних рекомендацій щодо застосування органічних кормових добавок у годівлі кролів, схвалених вченою радою Черкаської дослідної станції біоресурсів НААН (протокол № 4 від 15 травня 2026 р.), що забезпечує поширення результатів серед фахівців галузі кролівництва. Розроблений спосіб захищено патентом України на корисну модель № 162185 «Спосіб підвищення продуктивності кролів» (Додаток А). Результати роботи мають значення для адаптації тваринництва до змін клімату та забезпечення продовольчої безпеки, оскільки мікроелементи у формі наночитратів можна застосовувати у менших кількостях порівняно з неорганічними солями без втрати біологічної ефективності.

КІЛЬКІСТЬ І ВИД ПУБЛІКАЦІЙ

Монографії, підготовлені колективно (розділ у колективній монографії) – 1 [Yuzviak, M. O., 2023].

Методичні рекомендації (книжкове видання) – 1 [Юзьвяк, М. О., 2026].

Статті у виданнях, що індексуються в наукометричних базах даних Scopus / Web of Science – 4 [Yuzviak, M., 2024; Yuzviak, M. O., 2025; Юзьвяк, М. О., 2025; Yuzviak, M., 2026].

Статті у фахових виданнях України (категорія «Б») – 4 [Юзьвяк, М. О., 2024; Yuzviak, M., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М., 2026].

Матеріали конференцій (тези доповідей) – 15 [Юзьвяк, М., 2023; Юзьвяк, М., 2024; Юзьвяк, М., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М., 2024; Юзьвяк, М. О., 2024; Юзьвяк, М., 2024; Юзьвяк, М. О., 2025; Юзьвяк, М., 2025; Юзьвяк, М. О., 2025; Юзьвяк, М. О., 2025; Юзьвяк, М., 2025; Юзьвяк, М., 2025].

Патенти (Україна) – 1 [Юзьвяк, М. О., 2026].

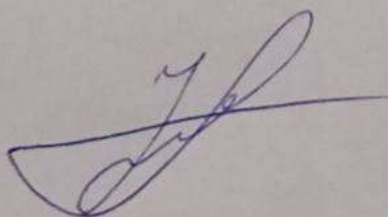
Загальна кількість цитувань: Web of Science – 0, Scopus – 7, Google Scholar – 25. Загальна кількість наукових праць – 26.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПОДАННЯ КОНКУРСНОЇ РОБОТИ

Конкурсна робота подається на конкурсний відбір на присудження Премії Верховної Ради України імені Ігоря Юхновського вперше. Автор Конкурсної роботи не отримував Премію Президента України для молодих вчених та Національну премію України імені Бориса Патона.

Нагороджений Подякою Департаменту агропромислового розвитку Львівської обласної державної адміністрації за сумлінну працю з нагоди Дня працівника сільського господарства (м. Львів, 2023 р.) (Додаток Г).

Доктор філософії,
науковий співробітник
Інституту біології тварин НААН



Мар'ян ЮЗЬВЯК

АНОТАЦІЯ

розділу колективної монографії

Yuzviak M. O., Lesyk Ya. V., Salyha Yu. T. Prospects for the use of minerals in rabbit nutrition. Achievements and research prospects in animal husbandry and veterinary medicine : a scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. P. 190–219. ISBN 978-9934-26-316-3. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-316-3-10>

У розділі наведено дані щодо біологічних особливостей та значення мінеральних речовин для організму й живлення кролів. Охарактеризовано анатомо-фізіологічні особливості травної системи кролів. Проведено аналіз літературних джерел з вивчення проблеми теплового стресу в промисловому кролівництві. З'ясовано особливості дії теплового стресу на фізіологічні параметри організму тварин. Описано особливості дії різних кількостей та наносполук мінеральних речовин на організм кролів. Висвітлено перспективу застосування наносполук мінеральних елементів у промисловому кролівництві.

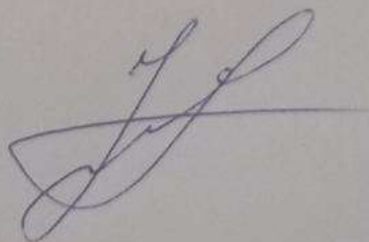
Мінеральні речовини є необхідними у забезпеченні повноцінного функціонування організму кролів, оскільки є компонентами багатьох фізіологічних процесів. Недостатнє або надлишкове споживання мікро- і макроелементів є причиною різних захворювань тварин. Фізіологічно обґрунтована кількість мінеральних речовин в організмі необхідна для формування скелету, регулювання метаболізму, функціонування нервової системи, м'язів та інших органів кролів у постнатальний період розвитку.

Дослідженнями встановлено негативний вплив теплового стресу на фізіологічні процеси в організмі кролів, що в свою чергу спричиняє економічні збитки та низькорентабельне їх утримання. Наночастинки мікроелементів знижують рівень окисного стресу в організмі та підвищують відтворну здатність кролів. Застосування наночастинок мінеральних речовин для корекції мінерального живлення кролів сприяє нормалізації фізіологічних функцій їхнього організму за дії теплового стресу.

Отже, аналізом літературних джерел щодо біологічних особливостей розвитку системи травлення кролів, впливу й потреби мінеральних речовин для організму кролів за умов інтенсивного росту й розвитку та у період дії теплового стресу показано необхідність застосування фізіологічно обґрунтованих їх кількостей.

Внесок автора: пошук літератури, оформлення та написання розділу монографії.

Доктор філософії,
науковий співробітник
Інституту біології тварин НААН



Мар'ян ЮЗЬВЯК

АНОТАЦІЯ

методичних рекомендацій (книжкове видання)

Лесик Я. В., Бойко О. В., Гончар О. Ф., Гамерник О. Й., Юзьвяк М. О. Методичні рекомендації щодо застосування органічних кормових добавок у годівлі кролів. Черкаси : Черкаська дослідна станція біоресурсів Національної академії аграрних наук України, 2026. 34 с. DOI: <https://doi.org/10.37617/MRFUOFDFR/2026>

У методичних рекомендаціях наведено дані щодо біохімічного та мінерального складу продуктів бджільництва, а також їх потенційного використання у кролівництві. Обґрунтовано перспективи поєданого застосування продуктів бджільництва та окремих мінеральних сполук нанотехнологічного походження. Методичні рекомендації можна використовувати для широкого кола фахівців, які займаються галуззю кролівництва (викладачам, науковим співробітникам, працівникам закладів освіти, технологам, студентам).

Висвітлено біологічне значення Цинку, Селену та Германію для перебігу фізіологічних процесів тварин і використання методів нанотехнології у живленні тварин, наведено біохімічні показники крові, показники антиоксидантного стану організму, маси тіла та забійного виходу кролів за вypoювання наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах теплового стресу.

Мікроелементи є важливими компонентами у раціоні тварин, що забезпечують важливі фізіологічні та біохімічні процеси, починаючи від будови кісток і завершуючи структурною цілісністю протеїнів і ліпідів. В умовах інтенсивного ведення виробництва додаткове надходження мікроелементів у достатній кількості є необхідним для функціонування імунної системи, забезпечення гомеостазу та оптимальних продуктивних показників. Для зменшення негативної дії підвищених температур доквілля значну увагу сучасних наукових досліджень зосереджено на використанні мінеральних сполук, виготовлених методами нанотехнології.

Результати дослідження біохімічних показників крові кролів, що характеризують стан метаболізму та функціонування їх організму, свідчать про позитивну динаміку змін за вypoювання цинку, селену та германію цитратів порівняно з контрольною групою. Отримані дані масометричних показників тушки та внутрішніх органів кролів вказують на позитивний вплив застосування наночастинок цинку, селену та германію цитратів в умовах теплового стресу.

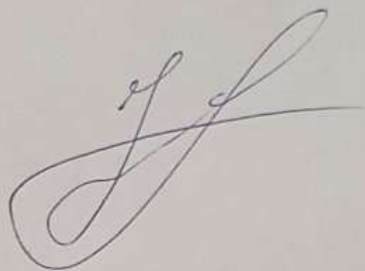
Результати виконаних експериментальних досліджень за умов теплового стресу мають вагоме прикладне значення для тваринництва, оскільки показують доцільність використання мікроелементів, виготовлених за методами нанотехнології, у промисловому кролівництві. Розроблена схема передбачає додаткове уведення органічних сполук мікроелементів у формі наночастинок з питною водою у кількості: цинку цитрату – 12 мг/кг маси тіла, селену цитрату – 60 мкг/кг маси тіла, германію цитрату – 12,5 мкг/кг маси тіла

молодняку кролів після відлучення у літній період для пом'якшення негативного впливу теплового стресу на їх організм.

Рекомендації розглянуто та схвалено вченою радою Черкаської дослідної станції біоресурсів НААН (протокол № 4 від 15 травня 2026 року).

Внесок автора: написання розділів методичних рекомендацій щодо застосування наночастинок цинку, селену та германію цитратів у годівлі кролів за умов теплового стресу (розділи 2–6) та висновків щодо схеми їх застосування.

Доктор філософії,
науковий співробітник
Інституту біології тварин НААН



Мар'ян ЮЗЬВЯК



Додаток Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор
Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького
к. пед. н. доцент.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ В ОСВІТІННИЙ ПРОЦЕС

- Найменування пропозиції для впровадження:**
Вплив наноцитратів Zn, Ge і Se на біохімічний профіль крові кролів за норми і теплового стресу
- Ким запропоновано, адреса, виконавці:**
м. Львів, вул. Василя Стуса, 38, Інститут біології тварин НААН
аспірант Юзв'як М. О.
- Джерело інформації:**
Юзв'як М. О., Лесик Я. В., Салига Ю. Т. Вплив наночастинок цитрату цинку, селену та германію на антиоксидантну активність кролів в умовах теплового стресу. *Фізіологічний журнал*. 2025. Том 71, № 2. С. 67–76. DOI: 10.15407/fz71.02.067.
Yuzviak M. O., Lesyk Y. V., Salyha Y. T. The antioxidant system in rabbit under combine action of severe heat stress and nanoparticles of zinc, selenium, and germanium citrate. *The Ukrainian Biochemical Journal*. 2025. Vol. 97, No. 2. P. 59–69. DOI: 10.15407/ubj97.02.059.
- Рекомендовано впровадити:** до використання у навчально-дослідницькій процес кафедри нормальної та патологічної фізіології імені Степана Стояновського «Фізіологія тварин» та «Ветеринарна патофізіологія».
- Термін впровадження:** з 01.09.2025 р.
- Ефективність впровадження** відповідно до критеріїв, що викладені в п.3

Показники	За даними	
	Розробників	Установи, що впроваджує
Досліджено антиоксидантні властивості наночастинок цинку, селену та германію цитратів на біохімічний профіль крові кролів за норми і теплового стресу. Встановлено, що додаткове вполювання цинку цитрату та селену цитрату характеризувалося позитивними змінами функціонування системи антиоксидантного захисту організму кролів. Основні положення викладені в дослідженнях антиоксидантних властивостей наночастинок цинку, селену та германію цитратів на біохімічний профіль крові кролів за норми і теплового стресу застосовується у навчально-дослідній роботі студентів та науковій роботі кафедри.		

- Зауваження, пропозиції:** розширити дослідження впливу наноцитратів Zn, Ge і Se на біохімічний профіль крові кролів за норми і теплового стресу.

Завідувач кафедри нормальної та патологічної
фізіології імені Степана Стояновського
Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького,
д.вет.н., професор

Ірина КОВАЛЬЧУК

Додаток В



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДРОГОБИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ІВАНА ФРАНКА

вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100; тел./факс: (03244) 1-04-74, тел.: (03244) 3-38-77
 e-mail: dspu@dspu.edu.ua, вебсайт: <http://dspu.edu.ua>, код згідно з ЄДРПОУ 02125438

Від 20.11. 2025 р. № 366

На № _____ від _____ 20__ р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
«Вплив наночитратів Zn, Ge і Se на біохімічний профіль крові кролів за норми і
теплогового стресу» на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 09 Біологія зі
спеціальності 091 Біологія
ЮЗЬВЯКА МАР'ЯНА ОСИПОВИЧА

Результати дисертаційної роботи Юзьяка Мар'яна Осиповича на тему «Вплив наночитратів Zn, Ge і Se на біохімічний профіль крові кролів за норми і теплового стресу» використовуються у Дрогобицькому державному педагогічному університеті імені Івана Франка при викладанні дисциплін: «Зоологія», «Регуляція обміну речовин» та «Фізіологія адаптацій». До основних положень, які використано при проведенні лекційних та лабораторних занять належать:

- Обґрунтована дія цинку цитрат – 12 мг/кг маси тіла, селену цитрат – 60 мкг/кг маси тіла, германію цитрат – 12,5 мкг/кг маси тіла для зниження негативного впливу теплового стресу в організмі молодняку кролів (Зоологія).
- Результати досліджень біохімічного, гематологічного, ліпідного, мінерального та антиоксидантного захисту організму кролів за випоювання цинку, селену та германію цитратів, для теоретичного обґрунтування оптимальних кількостей наномікроелементів в умовах впливу високих температур довкілля (Регуляція обміну речовин та Фізіологія адаптацій).

Практична реалізація ключових положень дисертаційного дослідження Юзьяка М. О. у навчальному процесі Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка дала змогу підвищити ефективність підготовки фахівців першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальностями 091 Біологія.

Впровадження результатів дослідження Юзьяка Мар'яна Осиповича на тему «Вплив наночитратів Zn, Ge і Se на біохімічний профіль крові кролів за норми і теплового стресу» було обговорено і затверджено на засіданні кафедри біології та хімії (протокол №15 від 6 листопада 2025 року).

Завідувач кафедри біології та хімії

Ірина БРИНДЗЯ

Проректор з наукової роботи,
 доктор педагогічних наук, професор

Микола ПАНТЮК



