

A retrospective analysis was conducted on the treatment outcomes of 134 patients with isolated mitral valve regurgitation who underwent surgery between 2020 and 2024. Group I comprised 59 patients who underwent repair via right-sided minithoracotomy, while group II included 75 patients who underwent median sternotomy. Intraoperative characteristics, the early postoperative course, length of hospital stay, analgesic requirements, and the timing of mobilization and recovery were analyzed.

The use of a minithoracotomy approach was associated with longer operative times, cardiopulmonary bypass, and aortic cross-clamping, yet it was characterized by reduced blood loss. At the same time, shorter stays in the intensive care unit and hospital, a shorter duration of analgesia, earlier mobilization, and a faster return to daily and professional activities were observed. There were no statistically significant differences regarding the duration of mechanical ventilation or the incidence of postoperative complications.

Key words: minimally invasive surgery, mitral valve, median longitudinal sternotomy, mitral valve insufficiency, acquired heart defects, functional rehabilitation.

ORCID кожного автора та його внесок до статті:

Fylypchuk V. V.: <https://orcid.org/0000-0001-6921-9746> ^{BCD}

Lazoryshynets V. V.: <https://orcid.org/0000-0002-1748-561X> ^{AEF}

Конфлікт інтересів:

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Адреса для кореспонденції

Филипчук Василь Васильович

ДУ ННЦССХ та СП ім. М.М. Амосова

Україна, 03038, м. Київ, вул. М. Амосова 6

Тел.: +380976502838

E-mail: vasilvasilivi4@gmail.com

А – концепція роботи та дизайн, В – збір та аналіз даних, С – відповідальність за статистичний аналіз, D – написання статті, Е – критичний огляд, F – остаточне затвердження статті.

Ця стаття розповсюджується на умовах ліцензії **Creative Commons Attribution (CC-BY)**, яка дозволяє необмежене використання, поширення та відтворення в будь-якому форматі за умови належного цитування оригінальної роботи © Всі автори, 2026

Стаття надійшла 21.05.2026 року

Стаття прийнята до друку 17.08.2026 року

Опубліковано 29.09.2026 року

DOI 10.29254/2077-4214-2026-3-182-348-353

УДК 591.3:546.48:546.47:546.72:577.112.38:615.9

Шевченко І. В., Нефьодова О. О.

**ВПЛИВ СУКЦИНАТІВ ЦИНКУ ТА ЗАЛІЗА НА МІКРОЕЛЕМЕНТНИЙ СТАТУС СЕРЦЯ
САМЦІВ ЩУРА ЗА УМОВ КАДМІЄВОЇ ІНТОКСИКАЦІЇ**

Дніпровський державний медичний університет (м. Дніпро, Україна)

elenanefedova1803@gmail.com

Цитотоксична дія кадмію зумовлена його здатністю конкурентно заміщувати цинк та залізо у клітинних структурах, викликаючи вторинні диселементози та метаболічні розлади. Перспективним напрямком корекції цих порушень є застосування сукцинатів есенціальних металів, які мають високу біодоступність і синергічний ефект. Проте характер їхнього протективного впливу та динаміка змін мікроелементного профілю серця за умов одночасного надходження з токсикантом залишаються недостатньо вивченими. Мета дослідження: оцінити динаміку змін мікроелементного статусу серця щурів за умов хронічного впливу хлориду кадмію при його ізольованому та комбінованому введенні з сукцинатами цинку або заліза. Дослідження проведено на самцях щурів, тварин було розподілено на чотири дослідні групи. Окрім контрольної була група ізольованого введення хлориду кадмію та 2 групи комбінованого надходження токсиканту з сукцинатом цинку, або заліза. Досліджувались серця тварин для визначення рівню кадмію, цинку та заліза поліелементним способом на 13-ту та 20-ту добу щоденного внутрішньошлункового введення. Хронічне ізольоване введення хлориду кадмію призводить до його прогресуючого депонування в міокарді щурів у 2,5 рази на 20-ту добу, що супроводжується мобілізацією ендогенного цинку в 1,7 рази та стійким вимиванням заліза на 29,1% відносно контролю. Комбіноване застосування сукцинатів біометалів ефективно протидіє деструктивному впливу токсиканта та стабілізує мінеральний гомеостаз серця. Найвищу детоксикаційну ефективність виявив сукцинат цинку, який повністю нормалізував рівень кадмію на 13-ту добу та стримав його кумуляцію надалі. Сукцинат заліза помірно обмежував депонування ксенобіотика, проте обидва комплекси повністю нівелювали

дефіцит ендogenous заліза в міокарді. Отримані експериментальні дані свідчать, що незважаючи на безперервне надходження кадмію, введення обох біометал-сукцинатів (Fe та Zn) ефективно протидіє виснаженню мікроелементних ресурсів серця та стабілізує мінеральний гомеостаз міокарду дослідних тварин.

Ключові слова: щури, експеримент, серце, міокард, кадмій, залізо, цинк, сукцинати.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами.

Експериментальне дослідження виконано у рамках науково-дослідної роботи «Дослідження морфогенезу органів і тканин у експериментальних тварин і людини під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів в онтогенезі» (номер державної реєстрації 0124U005025).

Вступ.

Антропогенне забруднення навколишнього середовища ксенобіотиками залишається однією з найбільш гострих та дискусійних проблем сучасної екологічної медицини, токсикології та експериментальної біології. Серед широкого спектра екотоксикантів особливу небезпеку становлять важкі метали, які мають здатність тривалий час персистувати у біосфері та мігрувати трофічними ланцюгами. Кадмій класифікується як високотоксичний кумулятивний елемент із надзвичайно тривалим періодом напіввиведення з організму людини та ссавців. Хронічна експозиція навіть низьких доз сполук кадмію, зокрема його найбільш розчинної форми – хлориду кадмію, детермінує розвиток поліорганної патології, супроводжуючись нефро-, гепато- та кардіотоксичними ефектами [1, 2]. Водночас у структурі кадмій-індукованих уражень кардіотоксичний ефект залишається одним із найменш вивчених, проте потенційно найбільш загрозливих для життєдіяльності організму.

Фундаментальною основою цитотоксичної дії кадмію є його здатність грубо порушувати гомеостаз та внутрішньоклітинний баланс есенціальних мікроелементів. Володіючи високою хімічною подібністю, кадмій виступає прямим і агресивним антиметаболітом таких біогенних металів, як цинк та залізо [3, 4]. Токсикант конкурентно заміщує ці елементи на рівні специфічних зв'язувальних ділянок клітинних мембран, іонних каналів та молекулярних транспортерів. Наслідком такої конкуренції є формування вторинного дефіциту есенціальних металів – диселементозів, що запускає каскад глибоких метаболічних розладів.

З огляду на зазначене, критично важливим є пошук ефективних засобів патогенетичної корекції та профілактики кадмієвої інтоксикації, здатних виступати безпечними біоантагоністами токсиканту [5, 6, 7]. Сучасна фармакологія та нутриціологія все більшу увагу приділяють координаційним сполукам есенціальних металів із природними метаболітами, зокрема солям бурштинової кислоти – сукцинатам [8, 9, 10]. Метаболічна форма введення мікроелементів має суттєві переваги завдяки високій біодоступності та синергічній дії обох компонентів.

Проте, попри терапевтичний потенціал сукцинатів, характер їхнього модифікуючого та протективного впливу за умов одночасного надходження з хлоридом кадмію в організм залишається недостатньо з'ясованим. На сьогодні у доступній літературі практично відсутній системний порівняльний аналіз, який би оцінював динаміку змін мікроелементного профі-

лю серця під паралельним впливом сукцинату цинку та сукцинату заліза на тлі кадмієвої інтоксикації.

Мета дослідження.

Визначення динаміки змін мікроелементного статусу серця дорослих самців щурів за умов хронічного впливу хлоридом кадмію при ізолюваному введенні та в комбінованому з сукцинатами цинку або заліза.

Об'єкт і методи дослідження.

Експериментальна частина дослідження була виконана на самцях щурів лінії Wistar віком 3–4 місяці, яких отримували з ліцензованого розплідника «Далі 2001» (м. Київ). Загальна кількість тварин – 70. Для проведення експерименту тварин було розподілено на чотири дослідні групи. Введення препаратів здійснювали внутрішньошлунково, щоденно впродовж 20-ти діб. Група I (контроль): тварини отримували 0,5 мл ізотонічного 0,9% розчину NaCl для встановлення фонових показників (n=10). Група II (модель інтоксикації): застосовували ізолюваний вплив хлориду кадмію у дозі 3,0 мг/кг (n=20). Група III (корекція цинком): на фоні щоденного введення 3,0 мг/кг хлориду кадмію тварини отримували сукцинат цинку в дозі 5 мг/кг для оцінки його протективних властивостей (n=20). Група IV (корекція залізом): схема передбачала поєднання кадмію із сукцинатом заліза в дозі 0,2 мг/кг з метою дослідження його корегуючої дії (n=20). Забір експериментальних зразків здійснювали на 13-ту та 20-ту добу дослідження. Усі вилучені серця заморожували без попередньої хімічної фіксації.

Вимірювання проб проводилися в Державному підприємстві «Український науково-дослідний інститут медицини транспорту Міністерства охорони здоров'я України (м. Одеса) згідно договору про науково-технічне співробітництво. Пробопідготовка і вимірювання вмісту металів проводилося відповідно до ГОСТ 30823-2002. Оцінку концентрації металів у біоматеріалах (серця) проводили методом атомно-емісійної спектроскопії на базі автоматизованого комплексу Емас-200 CCD. Ця сучасна комп'ютеризована система мінімізує участь оператора у процесі обчислень, виконуючи розрахунки автоматично. Визначення вмісту кадмію здійснювали на довжині хвилі 228,802 нм, цинку – 213,856 нм, заліза – 328,754 нм. Сила струму дугового розряду для всіх вимірювань була постійною і становила 15 А, а оптична щільність приладу мала такі параметри: 0,4 – для кадмію та цинку, 0,1 – для заліза.

Оцінку відмінностей між незалежними групами проводили із застосуванням t-критерію Стьюдента. Розрахунки виконували у середовищі R (версія 4.x) із використанням базових функцій пакету stats. Рівень статистичної значущості приймали на $p < 0,05$. Аналіз виконували відповідно до сучасних стандартів прозорості та відтворюваності біостатистичних досліджень.

Всі експериментальні процедури на щурах проводилися відповідно до міжнародних та національних норм біоетики (Директива ЄС 2010/63/EU, ARRIVE

guidelines) та були схвалені комітетом з біоетики Дніпровського державного медичного університету. Для мінімізації страждань тварин застосовувалися адекватні методи анестезії та гуманні кінцеві точки.

Результати дослідження та їх обговорення.

На 13-ту добу нашого експерименту найвищий рівень акумуляції кадмію в тканинах серця самців щурів очікувано визначався у групі ізольованого введення кадмію хлориду. Показник середніх значень рівню кадмію в цій когорті досягав $0,093 \pm 0,003$ мкг/г, що у 1,9 рази ($p < 0,05$) перевищувало аналогічні показники контрольної групи ($0,0472 \pm 0,003$ мкг/г) (рис. 1).

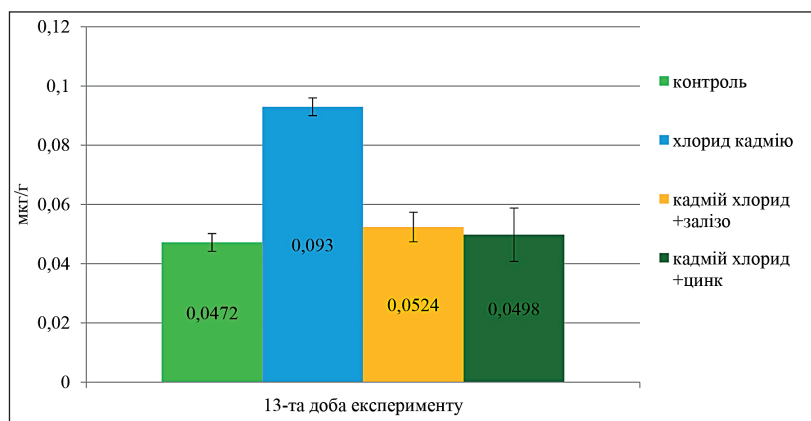


Рисунок 1 – Рівень накопичення кадмію (мкг/г) у серцях самців щурів в піддослідних групах на 13-ту добу експерименту.

Комбіноване введення кадмію із сукцинатом цинку забезпечило найбільш динамічне зниження рівня кадмію в міокарді у бік до контрольних значень на даному етапі дослідження, а саме: концентрація металу в серці впала до $0,0498 \pm 0,009$ мкг/г, що не мало статистично значущої різниці з контролем. Тенденцію до нормалізації та наближення до контрольних значень ми визначали і в групі комбінованого надходження кадмію з сукцинатом заліза ($0,0524 \pm 0,005$ мкг/г).

Механізм такої протекції, ймовірно, пов'язаний із прямою конкуренцією іонів цинку, заліза та кадмію за трансмембранні канали, а також з активацією синтезу металотіонінів, які зв'язують та знешкоджують вільні іони кадмію. Використання комбінованого надходження з токсикантом біометал-сукцинатів чи-

нить виражену детоксикаційну дію, перешкоджаючи надмірному депонуванню кадмію в міокарді.

Аналіз результатів рівню накопичення кадмію серцями самців на 20-тій добі експерименту продемонстрував недостовірне збільшення навіть в контрольній групі і становив $0,051 \pm 0,002$ мкг/г (рис. 2). Ми вважаємо, що підвищення обґрунтовується тим фактом, що експеримент проводився в кадмієнавантаженому регіоні України (місто Дніпро).

При цьому очікувано виростав і показник накопичення в групі ізольованого введення кадмію – $0,127 \pm 0,006$ мкг/г, що перевищувало контроль вже у 2,5 рази. У групах комбінованого введення на кінцевий термін дослідження найбільше зниження рівню кадмію визначалось в одночасному надходженні кадмію з сукцинатом цинку – $0,089 \pm 0,004$ мкг/г, цей показник перевищував контроль у 1,7 разів. Рівень накопичення кадмію при комбінації з залізом ($0,104 \pm 0,009$ мкг/г) в порівнянні до групи ізольованого впливу хлоридом кадмію зменшувався в порівнянні до групи інтоксикації, хоча і перевищував контроль у 2 рази.

Таким чином, аналіз та порівняння результатів поліелементного аналізу на обох термінах експерименту показав, що комбіноване введення кадмію з сукцинатом заліза або сукцинатом цинку знижує рівень накопичення кадмію в серцях дорослих самців, що доводить модифікуючий вплив сукцинатів на здатність кадмію затримуватись в міокарді самців щура в експерименті.

Надлишок в організмі кадмію порушує метаболізм есенціальних елементів. Оцінка вмісту заліза та цинку в міокарді та серцях дорослих самців дозволяє виявити специфіку диселементозу цих металів. Тому наступним етапом нашого дослідження стало визначення вмісту цинку в тканинах серця самців усіх експериментальних груп. Цинк є одним із найважливіших есенціальних мікроелементів для серцево-судинної системи, у здоровому організмі цинк виконує роль ключового регулятора структурної цілісності та функціональної активності кардіоміоцитів. Кадмій є прямим хімічним антагоністом цинку через схожість

їхніх фізико-хімічних властивостей, близькі іонні радіуси та спорідненість до сульфгідрильних груп. При хронічному кадміозі в міокарді кадмій буквально «витісняє» цинк із активних центрів металоферментів та цинк-залежних білків. Заміщення цинку на кадмій у молекулі супероксиддисмутази інактивує фермент, що призводить до вибухового зростання окисного стресу в серці, міокард починає відчувати гострий брак функціонального цинку. Таким чином, оцінка динаміки вмісту цинку в серці за умов металотоксикозу є принципово важливою для розуміння механізмів формування серцевих патологій.

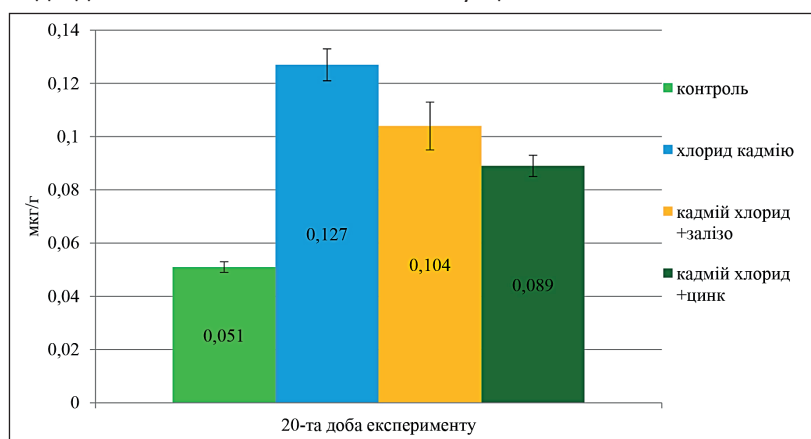


Рисунок 2 – Рівень накопичення кадмію (мкг/г) у серцях самців щурів в піддослідних групах на 20-ту добу експерименту.

Аналіз вмісту цинку в тканинах серця самців на 13-ту добу експерименту в нашому дослідженні виявив суттєві зміни цього показника під впливом токсиканта та за умов його комбінованого введення з біоелементами (рис. 3).

У тварин контрольної групи концентрація цинку в міокарді становила $(41,3 \pm 2,36 \text{ мкг/г})$, а ізольоване введення хлориду кадмію призвело до стрімкого та статистично значущого зростання рівня цинку в серцевому м'язі – до $76,4 \pm 5,76 \text{ мкг/г}$, що в 1,8 разів перевищує контрольні значення.

Мобілізація ендogenous цинку або активація цинк-залежних систем антиоксидантного захисту є звичайною відповіддю на індукований ксенобіотиком гострий токсичний стрес. Сумісне застосування хлориду кадмію із залізом супроводжувалося менш вираженим накопиченням цинку в міокарді ($53,7 \pm 4,52 \text{ мкг/г}$) порівняно з групою ізольованого введення, хоча цей показник залишався вищим за контроль.

Це вказує на часткову нівелюючу дію заліза на процеси перерозподілу цинку в тканинах серця. У групі тварин, які отримували хлорид кадмію разом із цинком, вміст досліджуваного мікроелемента в серці становив $91,36 \pm 7,17 \text{ мкг/г}$, що було прогнозовано за рахунок екзогенного надходження елемента, згідно протоколу експерименту.

На 20-тій добі дослідження в усіх групах дослідних тварин визначалось стабільне утримання рівню цинку в серцях самців щурів контрольної групи у порівнянні до попереднього терміну дослідження (рис. 4). У групі ізольованого введення кадмію рівень цинку становив $73,44 \pm 5,4 \text{ мкг/г}$, що було у 1,7 рази вище за рівень в групі контролю. Недостовірне підвищення рівню цинку в серцях самців визначалось також і в групі комбінованого введення кадмію та сукцинату заліза – $48,16 \pm 3,7 \text{ мкг/г}$.

У групі, де поєднували кадмій із цинком, фіксувалося подальше зростання концентрації цинку в міокарді самців, проте через специфіку експериментального протоколу ці результати не зіставлялися. Отже, тривале введення хлориду кадмію як окремо, так і спільно із сукцинатами металів, трансформує характер кумуляції цинку в серцевій тканині самців щура.

Базовий рівень заліза в міокарді серця щура є чітко детермінованим, проте може відрізнятися залежно від статі. Як показав аналіз отриманих нами результатів в хронічному дослідженні накопи-

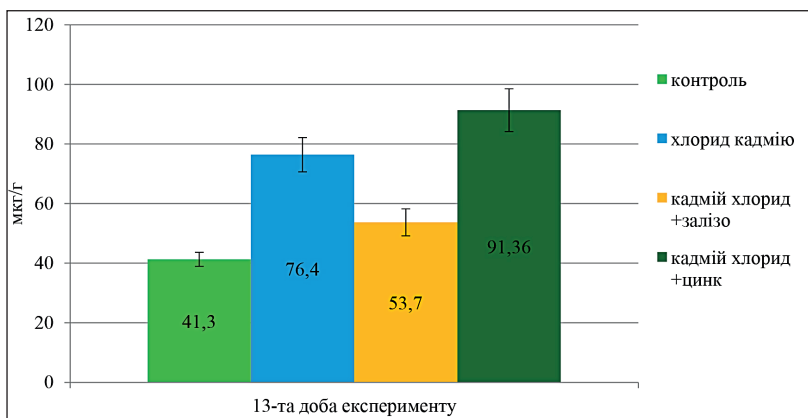


Рисунок 3 – Рівень накопичення цинку (мкг/г) у серцях самців щурів в піддослідних групах на 13-ту добу експерименту.

чення заліза міокардом серця у самців, при впливі хлоридом кадмію, рівень заліза знижується вже на 13-ту добу експерименту. В контролі на цей термін експерименту рівень досліджуваного мікроелемента в міокарді серця самців становив $352,7 \pm 9,47 \text{ мкг/г}$, а в групі кадмієвої інтоксикації знижувався у 1,3 рази до $269,9 \pm 14,50 \text{ мкг/г}$, тобто на 24,5%. У групі комбінованого надходження кадмію з сукцинатом заліза, показник відновлювався у бік до контрольних значень,

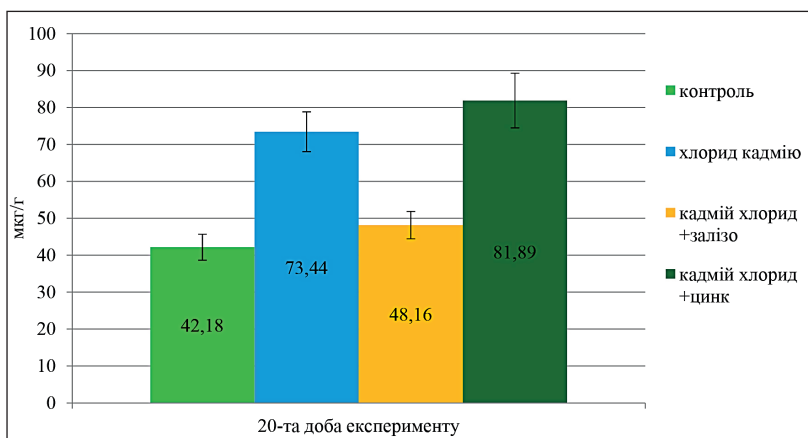


Рисунок 4 – Рівень накопичення цинку (мкг/г) у серцях самців щурів в піддослідних групах на 20-ту добу експерименту.

що було логічним ($374,3 \pm 18,6 \text{ мкг/г}$), бо відбувалось щоденне надходження самого заліза в організм. В групі комбінованого введення кадмію з сукцинатом цинку також визначалось збереження запасів заліза міокардом серця до $290,3 \pm 15,9 \text{ мкг/г}$, що свідчить про

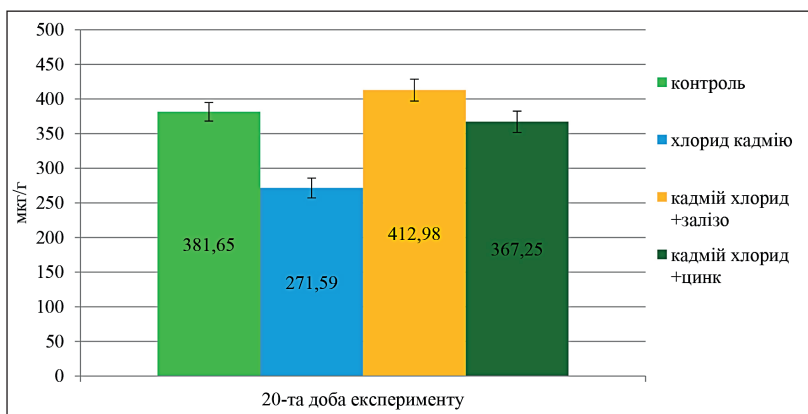


Рисунок 5 – Рівень накопичення заліза (мкг/г) у серцях самців щурів в піддослідних групах на 20-ту добу експерименту.

модифікуючий вплив сукцинатів заліза та цинку на кардіотоксичність хлориду кадмію, бо ці мікроелементи підтримували мінеральний гомеостаз в серці дослідних тварин в нашому експерименті на щурах.

На наступному терміні дослідження, тобто на 20-тій добі, рівень заліза в серцях дорослих самців розподілявся наступним чином (рис. 5).

На 20-ту добу в групі контролю цей показник недостовірно збільшувався ($381,65 \pm 13,43$ мг/г), проте хронічне надлишкове надходження кадмію в організм дослідних тварин продовжувало знижувати рівень заліза в серцях самців групи кадмієвої інтоксикації ($271,59 \pm 14,33$ мг/г), тобто зниження сягало вже 29,1% в порівнянні до контролю. Таким чином, тенденція на зниження рівню заліза в міокарді сердець самців щура продовжувалась впродовж періоду спостереження в експериментальній групі ізольованого впливу хлоридом кадмію. В той же час, незважаючи на щоденне надходження тої самої дози кадмію, в групах комбінованого введення рівень заліза в міокарді сердець самців виявлявся більшим у порівнянні до групи ізольованого введення кадмію.

Таким чином, комбіноване застосування кадмію із сукцинатом заліза або сукцинатом заліза чинить виражену регуляторну дію на перерозподіл не тільки кадмію, а і збереження рівню цинку та заліза в міокарді самців щурів ближче до значень контрольної групи, що свідчить про потенційну модифікуючу дію сукцинатів щодо кардіотоксичності кадмію.

Висновки.

1. Хронічне ізольоване введення хлориду кадмію самцям щурів призводить до прогресуючого депонування металу в міокарді: на 13-ту добу його рівень зростає у 1,9 рази порівняно з контролем, а на 20-ту добу – у 2,5 рази.

2. Сукцинат цинку виявив найвищу детоксикаційну ефективність, забезпечивши повну нормалізацію рівня кадмію в серці самців на 13-ту добу та стримування його кумуляції на 20-ту добу хронічного експерименту.

3. Комбіноване застосування сукцинату заліза з кадмієм помірно обмежувало депонування ксенобіотика на обох етапах експерименту.

4. Виражена детоксикаційна дія досліджуваних комплексів «біометал-сукцинат» перешкоджає надмірному депонуванню кадмію в міокарді. Патогенетичний механізм такої протекції реалізується через пряму конкуренцію іонів цинку та заліза із токсичними іонами кадмію за трансмембранні канали кардіоміоцитів, а також через активацію синтезу ендогенних металотіонеїнів, які зв'язують та знешкоджують вільні іони кадмію.

5. Ізольоване введення хлориду кадмію трансформує характер кумуляції цинку, викликаючи його стрімку мобілізацію в міокарді порівняно з контролем і стабільно утримує на високому рівні (у 1,7 рази вище за контроль) до 20-ї доби.

6. Хронічне ізольоване введення хлориду кадмію викликає стійке та прогресуюче вимивання ендогенного заліза з тканин міокарда. Дефіцит біометалу фіксується вже на 13-ту добу експерименту і поглиблюється до 20-ї доби, сягаючи 29,1% відносно контролю. Комбіноване надходження кадмію із сукцинатом заліза повністю нівелює деструктивний вплив токсиканта на залізистий профіль міокарда. Сумісне застосування кадмію із сукцинатом цинку також виявляє виражену протективну дію щодо збереження депо заліза в серцевому м'язі, що підтверджує здатність цинкового комплексу зменшувати загальну кардіотоксичність ксенобіотика.

7. Отримані експериментальні дані свідчать, що незважаючи на безперервне надходження кадмію, введення обох біометал-сукцинатів (Fe та Zn) ефективно протидіє виснаженню мікроелементних ресурсів серця та стабілізує мінеральний гомеостаз міокарду дослідних тварин.

Перспективи подальших досліджень.

На наш погляд, досить цікавим виглядає проведення в майбутньому кореляційного аналізу між рівнем накопичення мікроелементів та ваговими показниками серця і гістологічними змінами в міокарді сердець щурів усіх груп на обох досліджуваних термінах.

Література

- Genchi G, Sinicropi MS, Lauria G, Carocci A, Catalano A. The Effects of Cadmium Toxicity. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(11):3782. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Yu HT, Zhen J, Leng JY, Cai L, Ji HL, Keller BB. Zinc as a countermeasure for cadmium toxicity. Acta Pharmacol Sin. 2021;42(3):340-346. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41401-020-0396-4>
- Shatorna VF, Lomyha LL. Vplyv soley kadmiyu na stan sertsevo-sudynnoyi systemy. Visnyk problem biolohiyi ta medytsyny. 2022;2(164):79-88. DOI: <https://dx.doi.org/10.29254/2077-4214-2022-2-1-164-79-88> [in Ukrainian].
- Shatorna VF, Lomyha LL. Analysis of changes in the microelement status of the heart of rats during chronic cadmium intoxication. Visnyk problem biolohiyi ta medytsyny. 2023;171:107-116. DOI: <http://dx.doi.org/10.29254/2077-4214-2023-4-171-107-116>
- Kukongviriyapan U, Apaijit K, Kukongviriyapan V. Oxidative Stress and Cardiovascular Dysfunction Associated with Cadmium Exposure: Beneficial Effects of Curcumin and Tetrahydrocurcumin. Tohoku J Exp Med. 2016;239(1):25-38. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.239.25>
- Iddrisu L, Huang L, Mkulo EM. Natural defenses against cadmium toxicity: mechanisms and novel strategies - a review. Biol Trace Elem Res. 2026;204:4481-4503. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-026-04977-y>
- Zhang K, Long M, Dong X, Liu W, Li J, Wang X, et al. Cadmium induces renal iron deficiency and chronic kidney injury by disrupting iron metabolism in rats. Int J Mol Sci. 2024;25(2):763. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25020763>
- Bernhoft RA. Cadmium toxicity and treatment. ScientificWorldJournal. 2013;2013:394652. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/394652>
- Shamelashvili KL. Stupin nakopychennya kadmiyu ta tsynku v orhanakh doroslykh ta embrionakh shchuriv. Visnyk problem biolohiyi i medytsyny. 2020;4(158):84-87. DOI: <https://dx.doi.org/10.29254/2077-4214-2020-4-158-84-87> [in Ukrainian].
- Ali RA, Awadalla EA, Hamed AS, Mostafa DEF. Cardiotoxicity of Cadmium and Its Effects on Heart Efficiency During Early and Late Chick Embryogenesis. Cardiovasc Toxicol. 2024;24(9):982-1003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12012-024-09894-x>

ВПЛИВ СУКЦИНАТІВ ЦИНКУ ТА ЗАЛІЗА НА МІКРОЕЛЕМЕНТНИЙ СТАТУС СЕРЦЯ ЗА УМОВ КАДМІЄВОЇ ІНТОКСИКАЦІЇ

Шевченко І. В., Нефьодова О. О.

Резюме. Кадмій класифікується як високотоксичний кумулятивний елемент із надзвичайно тривалим періодом напіввиведення з організму людини та ссавців, водночас у структурі кадмій-індукованих уражень кардіотоксичний ефект залишається одним із найменш вивчених. Метою дослідження було визначення динаміки змін мікроелементного статусу серця дорослих самців щурів за умов хронічного впливу хлоридом кадмію при ізольованому введенні та в комбінованому з сукцинатами цинку або заліза.

Експериментальна частина дослідження була виконана на самцях щурів, тварин було розподілено на чотири дослідні групи. Окрім контрольної була група ізольованого введення хлориду кадмію та 2 групи комбінованого надходження токсиканту з сукцинатом цинку, або сукцинатом заліза. Введення препаратів здійснювали внутрішньошлунково, щоденно впродовж 20-ти діб. Вилучались серця тварин для визначення рівню кадмію, цинку та заліза поліелементним способом.

Хронічне ізольоване введення хлориду кадмію самцям щурів призводить до прогресуючого депонування металу в міокарді: на 13-ту добу його рівень зростає у 1,9 рази порівняно з контролем, а на 20-ту добу – у 2,5 рази. Ізольоване введення кадмію призводить також до зміни рівню цинку та заліза в міокарді серця щурів.

Комбіноване введення кадмію із сукцинатом заліза або сукцинатом цинку чинить виражену регуляторну дію на перерозподіл не тільки кадмію, а і збереження рівню цинку та заліза в міокарді самців щурів ближче до значень контрольної групи, що свідчить про потенційну модифікуючу дію сукцинатів щодо кардіотоксичності кадмію. Отримані експериментальні дані свідчать, що незважаючи на безперервне надходження кадмію, введення обох біометал-сукцинатів (Fe та Zn) ефективно протидіє виснаженню мікроелементних ресурсів серця та стабілізує мінеральний гомеостаз міокарду дослідних тварин.

Ключові слова: щури, експеримент, серце, міокард, кадмій, залізо, цинк, сукцинати.

INFLUENCE OF ZINC AND IRON SUCCINATES ON THE MICROELEMENTAL STATUS OF THE HEART UNDER THE CONDITIONS OF CADMIUM INTOXICATION

Shevchenko I. V., Nefodova O. O.

Abstract. Cadmium is classified as a highly toxic cumulative element with an extremely long half-life in humans and mammals, while in the structure of cadmium-induced lesions, the cardiotoxic effect remains one of the least studied. The aim of the study was to determine the dynamics of changes in the microelement status of the heart of adult male rats under conditions of chronic exposure to cadmium chloride with isolated administration and in combination with zinc or iron succinates.

The experimental part of the study was performed on male rats, the animals were divided into four experimental groups. In addition to the control group, there was a group of isolated administration of cadmium chloride and 2 groups of combined administration of the toxicant with zinc succinate or iron succinate. The drugs were administered intragastrically, daily for 20 days. The hearts of the animals were removed to determine the level of cadmium, zinc and iron by the polyelement method.

Chronic isolated administration of cadmium chloride to male rats leads to progressive deposition of the metal in the myocardium: on the 13th day its level increases by 1.9 times compared to the control, and on the 20th day – by 2.5 times. Isolated administration of cadmium also leads to changes in the level of zinc and iron in the myocardium of the rat heart.

Combined administration of cadmium with iron succinate or zinc succinate has a pronounced regulatory effect on the redistribution of not only cadmium, but also maintaining the level of zinc and iron in the myocardium of male rats closer to the values of the control group, which indicates a potential modifying effect of succinates on cadmium cardiotoxicity. The obtained experimental data indicate that despite the continuous supply of cadmium, the administration of both biometal succinates (Fe and Zn) effectively counteracts the depletion of microelement resources of the heart and stabilizes the mineral homeostasis of the myocardium of experimental animals.

Key words: rats, experiment, heart, myocardium, cadmium, iron, zinc, succinates.

ORCID кожного автора та його внесок до статті:

Shevchenko I. V.: <https://orcid.org/0000-0001-7928-9094>^{BCD}

Nefodova O. O.: <https://orcid.org/0000-0002-1665-9032>^{AEF}

Конфлікт інтересів:

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Адреса для кореспонденції

Нефьодова Олена Олександрівна
Дніпровський державний медичний університет
Україна, 49044, м. Дніпро, вул. Володимира Вернадського 9
Тел.: 0930146447
E-mail: elenanefedova1803@gmail.com

А – концепція роботи та дизайн, В – збір та аналіз даних, С – відповідальність за статичний аналіз, D – написання статті, Е – критичний огляд, F – остаточне затвердження статті.

Ця стаття розповсюджується на умовах ліцензії **Creative Commons Attribution (CC-BY)**, яка дозволяє необмежене використання, поширення та відтворення в будь-якому форматі за умови належного цитування оригінальної роботи © Всі автори, 2026

Стаття надійшла 22.05.2026 року
Стаття прийнята до друку 19.08.2026 року
Опубліковано 29.09.2026 року